



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIUM OTĚRUVZDORNÝCH VRSTEV VYTVOŘENÝCH LASEROVÝM NAPLAVOVÁNÍM POMOCÍ METODY DYNAMICKÉHO RÁZOVÉHO IMPAKTORU

STUDY OF ABRASION RESISTANT LAYERS CREATED BY LASER CLADDING BY MEANS OF
METHODES OF DYNAMIC SHOCK IMPACTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ VÁCLAVÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ondřej Václavík

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Studium otěruvzdorných vrstev vytvořených laserovým naplavováním pomocí metody dynamického rázového impaktoru

v anglickém jazyce:

Study of abrasion resistant layers created by laser cladding by means of methodes of dynamic shock impactor

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie laserového navařování dokáže vytvářet tenké otěruvzdorné vrstvy. Cílem práce je studium otěruvzdornosti různých druhů vrstev pomocí metody dynamického rázového impaktoru, kdy povrch vrstvy je vystaven periodickým nárazům tvrdokovové kuličky. Výsledky z testu použít pro porovnání vytvořených vrstev.

Cíle diplomové práce:

Seznámení se z technologií laserového naplavování. Seznámení se s metodou dynamického rázového impaktoru. Interpretace dosažených výsledků pro ohodnocení otěruvzdornosti vrstvy.

Seznam odborné literatury:

1. ION C. J.: Laser processing of engineering materials. Elsevier, 2005
2. J.SOBOTA and co.: Evaluation of hardness, tribological behaviour and impact load of carbon-based hard composite coatings exposed to the influence of humidity. Diamond & Related Materials (2011)
3. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.l: Laserové technológie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
4. DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 2.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

VÁCLAVÍK Ondřej: Studium otěruvzdorných vrstev vytvořených laserovým naplávováním pomocí metody dynamického rázového impaktoru.

Diplomová práce se zabývá studiem vrstev vytvořených laserovým navařováním a metodou testování otěruvzdornosti těchto vrstev pomocí metody dynamického rázového impaktoru. V teoretické části práce jsou popsány laserové technologie a jejich aplikace, zkoušky tvrdosti a metody testování povlaků. V experimentální části byly provedeny a vyhodnoceny navržené mechanické zkoušky pro zvolené materiály. V závěru práce jsou shrnuty konečné výsledky experimentu.

Klíčová slova: laserové navařování, metoda dynamického rázového impaktoru, otěruvzdornost, laser, vlastnosti povlaku

ABSTRACT

VÁCLAVÍK Ondřej: Study of abrasion resistant layers created by laser cladding by means of methods of dynamic shock impactor.

Diploma thesis studies the layers created by laser cladding and method of testing abrasion resistance of these layers using the method of dynamic shock impactor. In the theoretical part describes laser technologies and their applications, hardness testing and methods of testing of coatings. Proposed by the mechanical testing of the selected materials were carried out and evaluated in the experimental part. The conclusion summarizes final results of the experiment.

Keywords: laser cladding, method of dynamic shock impactor, abrasion resistance, laser, properties of coating

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VÁCLAVÍK, Ondřej. *Studium otěruvzdorných vrstev vytvořených laserovým naplávováním pomocí metody dynamického rázového impaktoru*. Brno, 24.05.2013. 54 s, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉPROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 24. 5. 2013

.....

Bc. Ondřej Václavík

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Janu Grossmanovi, CSc. a panu Vojtěchu Řiháčkovi za uskutečnění mechanických zkoušek.

Tato práce vznikla za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017).

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

	ÚVOD.....	11
1	LASER.....	12
1.1	HISTORIE	12
1.2	VLASTNOSTI LASEROVÉHO PAPRSKU	13
1.3	ZÁKLADNÍ ČÁSTI LASEROVÝCH SYSTÉMŮ A JEJICH ROZDĚLENÍ	15
1.4	POŽADAVKY KLADENÉ NA LASEROVÉ ZAŘÍZENÍ	16
1.5	LASERY POUŽÍVANÉ V PRŮMYSLU	17
1.5.1	CO ₂ laser	17
1.5.2	Nd:YAG laser	17
1.5.3	Diskový laser	18
1.5.4	Vláknový laser	19
1.5.5	Diodový laser	19
1.5.6	Srovnání jednotlivých laserů a jejich vlastností	20
2	PRŮMYSLOVÉ APLIKACE LASERU.....	21
2.1	ŘEZÁNÍ LASEREM	21
2.2	VRTÁNÍ LASEREM	22
2.3	SVAŘOVÁNÍ LASEREM.....	23
2.4	KALENÍ LASEREM	24
2.5	PRŮMYSLOVÉ ZNAČENÍ, GRAVÍROVÁNÍ A MIKROOBRÁBĚNÍ POMOCÍ LASEROVÉHO PAPRSKU	25
2.6	LASEROVÉ NAVAŘOVÁNÍ	25
2.6.1	Rozdíly mezi laserovým navařováním, legování a glazováním	26
2.6.2	Metody laserového navařování	26
2.6.3	Vlastnosti navařených vrstev	28
2.6.4	Druhy a vlastnosti přídavných materiálů	29
2.6.5	Doprava prášku	30
2.6.6	Srovnání laserového navařování s ostatními metodami povrchových úprav ...	31
3	ZKOUŠKY TVRDOSTI	32
3.1	ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE BRINELLA	32
3.2	ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE VICKERSE	33
3.3	ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE ROCKWELLA	33
3.4	ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE KNOOPA	34
3.5	ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI.....	35
4	ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ TENKÝCH VRSTEV A POVLAKŮ	36
4.1	METODA „PIN-ON-DISK“	36
4.2	METODA „ABRASION WHEEL TEST“	37
4.3	METODA „SCRATCH TEST“	37
4.4	METODA DYNAMICKÉHO RÁZOVÉHO IMPAKTORU.....	38

5	EXPERIMENT	40
5.1	CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ A PŘÍPRAVA VZORKŮ	40
5.2	PŘÍSTROJE POUŽITÉ PŘI EXPERIMENTU	42
5.3	ZKOUŠKA DYNAMICKÉHO RÁZOVÉHO IMPAKTORU	44
5.4	VYHODNOCENÍ MAKROSTRUKTURY	47
5.5	VYHODNOCENÍ MIKROSTRUKTURY	49
5.6	MĚŘENÍ TVRDOSTI A MIKROTVRDOSTI	50
5.7	TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	53
6	ZÁVĚR	54

Seznam použité literatury

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků a tabulek

Seznam příloh

ÚVOD

S rychlým růstem laserových aplikací a snížením nákladů na laserové systémy, získává laserové zpracování materiálů stále větší význam v různých odvětvích. Automobilový průmysl, letectví, námořnictvo, obrana a v mnoha dalších průmyslových aplikacích, široce přizpůsobených pro laserové svařování, řezání a kalení. Mezi aplikacemi laserové techniky získává v posledních letech značnou pozornost laserové navařování. Díky své rozmanité možnosti zpracovávání materiálu, jako je například pokovování, oprava součástí, vytváření prototypů a dokonce i malý objem výroby, se stává laserové navařování strategickou technologií dnešní doby.

Tato práce je v teoretické části zaměřena na laserovou technologii a především pak na laserové navařování kovových prášků na substrát. V experimentu bude proveden test vybraných povrchových vrstev, připravených laserovým navařováním, na dynamickém měřiči otěru. Dále budou provedeny zkoušky tvrdosti, mikrotvrdosti a vzorky se vyhodnotí z hlediska mikro a makrostruktury.



Obr. 1 Ukázka využití laserového navařování v praxi [66]

1 LASER [6]

Zkratka Laser je z anglického názvu (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) a lze ho přeložit jako zesílení světla stimulovanou emisí záření.

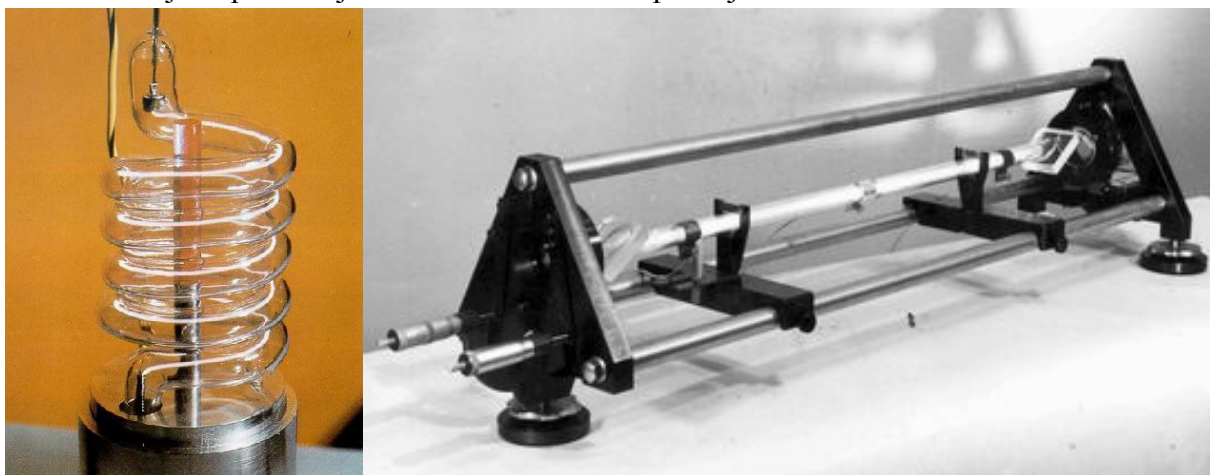
Laser je optický zdroj elektromagnetického záření, založený na principech kvantové mechaniky. Světlo je vyzařováno ve formě úzkého svazku, který je monochromatický a koherentní. To umožňuje zaostřit paprsek na velmi malý průměr s minimální rozbíhavostí.

1.1 Historie [17], [18], [21]

V polovině 19. století se začali fyzikové zabývat vlastnostmi světla. Matematicky vše vysvětlil J.C. Maxwell, který prokázal spojitost mezi elektromagnetickým polem hmoty. V roce 1900 vystoupil fyzik M. Planck s revoluční teorií kvantování energie elektromagnetického záření, vykládající světlo jako malé částice energie „kvanty“, základ kvantové fyziky. Při dalším studiu kvantových vlastností atomů v roce 1917, A. Einstein předpověděl, že kromě jevů jako jsou absorpce a spontánní emise, může za určitých podmínek existovat ještě stimulovaná emise, na které jsou lasery založeny. R.W. Landenburg a H. Kopfermann potvrzují existenci stimulované emise v roce 1928. Později v roce 1940 navrhuje fyzik V. A. Fabrikant použít stimulovanou emisi v plynném prostředí k zesilování světla. Poprvé byla tato myšlenka realizována pro zesilování záření v mikrovlnné oblasti.

V roce 1954 sovětsí fyzikové N.G. Basov a A.M. Prochorov a americký fyzik Ch.H. Townes položili základy novému fyzikálnímu oboru - kvantové elektronice. Toho roku byl sestrojen první kvantový generátor na světě (maser), ve kterém docházelo ke vzniku mikrovlnného záření molekul čpavku. Od čpavkového maseru to byl už jen kousek k sestrojení kvantového zesilovače, pracujícího namísto mikrovln se stimulovanou emisí světla. Uběhlo šest let a dne 16. května 1960 Theodore Maiman, C.K. Asawa, a I.J. D'Haenens zkonstruovali první laser. Jako aktivní látka byla použita tyčinka ze syntetického rubínu

a vyzařoval červené světlo o vlnové délce 694,3 nanometrů. Od tohoto roku začal prudký vývoj různých typů laserů zároveň s vývojem laserové technologie. V České republice se v roce 1962 jako první objevil maser a laser o rok později.

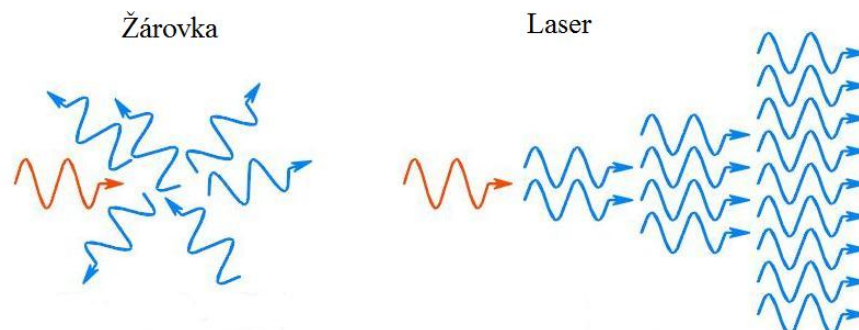


Obr. 2 Model prvního laseru (vlevo) a prvního plynového laseru u nás (vpravo) [18]

Laser se od doby svého vzniku uplatnil v celé řadě oborů. Univerzální laser neexistuje, a proto co obor, to jiný typ laseru, aby vyhovoval všem podmínkám a požadavkům. Dnes se využívá například v medicíně, při různých technologických operacích ve výrobě, metrologii, astronomii a v mnoha dalších oborech.

1.2 Vlastnosti laserového paprsku [3], [19], [22], [25], [35], [42], [59]

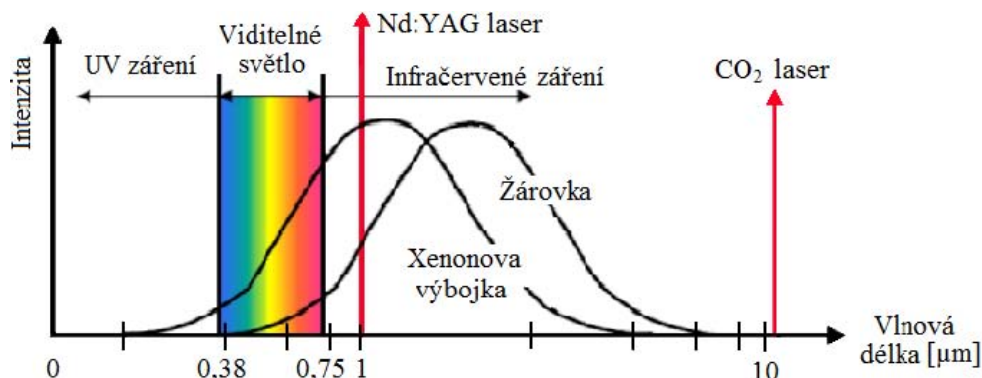
Laserové záření se liší od elektromagnetického záření díky svým jedinečným vlastnostem. Mezi nejvýznamnější vlastnosti se řadí monochromaticita, koherentnost, módová struktura, směrovost a polarizace svazku. Rozdíl mezi zářením běžného tepelného zdroje (žárovka) a laseru ukazuje obr. 3.



Obr. 3 Srovnání záření žárovky a laseru [25]

❖ Monochromaticita

Podstata monochromaticity záření spočívá v tom, že stimulovaně emitované fotony mají všechny stejnou vlnovou délku, a tím i energii. Na vlnové délce záření závisí i jeho barva. Proto je laserový paprsek monochromatický. Se zkracující se vlnovou délkou, energie fotonů roste.



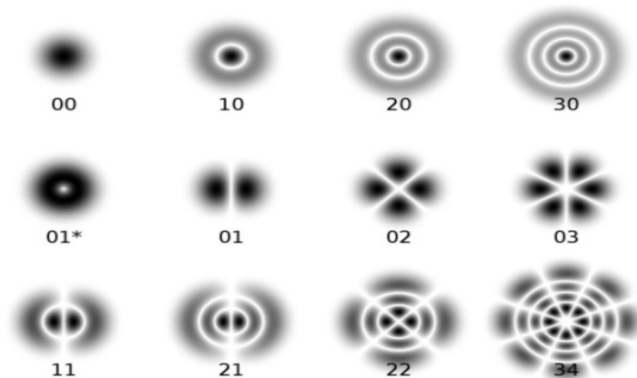
Obr. 4 Elektromagnetické spektrum [42]

❖ Koherentnost

Koherentní světlo je složené ze světél, která mají v daném místě a daném okamžiku stejnou vlnovou délku a stejnou fázi. Běžné zdroje vyzařují světlo nekoherentní.

❖ Módová struktura

V aktivním prostředí laseru se šíří elektromagnetické vlnění. Podle typu rezonátoru a výkonu laseru rozlišujeme v příčném řezu paprsku tzv. elektromagnetické módy TEM (transverzální elektromagnetický mód), které můžeme zachytit na fotografickém papíře, nebo si je nechat graficky zobrazit na monitoru pomocí analyzátoru svazku. TEM₀₀ s jedním výrazným maximem intenzity v ose



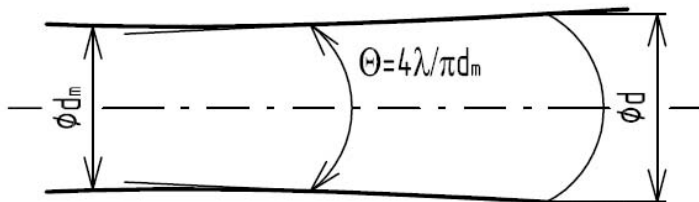
Obr. 5 Ukázka elektromagnetických módů TEM [35]

svazku se nazývá gaussovský a vzniká v laserech menšího výkonu. Dokonalá symetrie módu je důležitá pro správné využití v průmyslových aplikacích.

❖ Směrovost

Významnou vlastností laserového svazku je jeho velká směrovost, jinými slovy nízká rozbíhavost (divergence). Směrovost paprsku se charakterizuje prostorovým úhlem. V běžné praxi se však jako parametr neuvádí prostorový úhel, ale rovinný úhel divergence paprsku, pokud má prostorový úhel tvar kužele (v případě jiného tvaru paprsku se uvádějí hodnoty dvou rovinných úhlů navzájem na sebe kolmých). Malá rozbíhavost a vysoká koherence umožňují fokusaci (zaostření) svazku na velmi malý průměr, a tím dosáhnout vysokou hustotu výkonu laserového záření.

Všeobecně je možné určit velikost divergence θ jako závislost na vlnové délce a výstupního průměru paprsku podle vztahu:



Obr. 6 Rozbíhavost laserového paprsku [3]

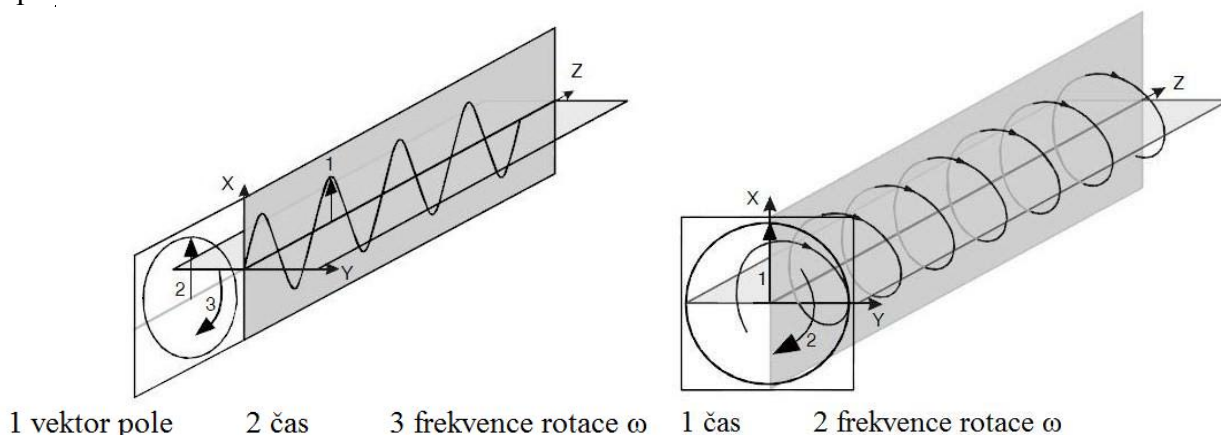
$$\theta = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi \cdot d_m} ; \quad (1.0)$$

kde: λ – vlnová délka záření [mm],
 π – Ludolfovo číslo,
 d_m – průměr paprsku na výstupu z rezonátoru [mm].

❖ Polarizace

Světlo je příčné elektromagnetické vlnění, a proto vektor intenzity elektrického pole (E) kmitá kolmo ke směru jeho šíření. Pokud vektor E kmitá v jedné rovině, mluvíme o světle lineárně polarizovaném.

Provádíme-li řezání s lineárně polarizovaným laserovým paprskem, pak kvalita výsledné řezné hrany závisí na směru řezání. V případě, že směr pohybu řezání odpovídá směru polarizace vlnění, je řez kvalitní a bez otřepů. Řezná rychlost může být v tomto případě velmi vysoká. Pokud je směr polarizace vlnění kolmý na směr pohybu řezání, je hrana řezu nekvalitní s otřepy. Lineárně polarizované laserové světlo je tedy vhodné pouze pro aplikace, u kterých je směr řezu totožný se směrem polarizace. V praxi je však žádoucí, aby řezání laserem zůstalo ve všech směrech stejně kvalitní. Toho se dosahuje použitím kruhově polarizovaného záření.

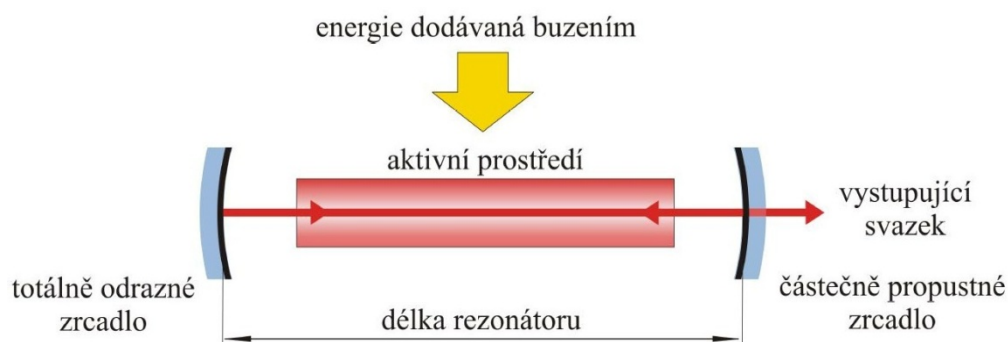


1 vektor pole 2 čas 3 frekvence rotace ω 1 čas 2 frekvence rotace ω

Obr. 7 Lineární polarizace (vlevo) a kruhová polarizace (vpravo) paprsku laseru [59]

1.3 Základní části laserových systémů a jejich rozdělení [7], [23], [25], [26]

Pro vznik laserového paprsku jsou důležité tři základní konstrukční prvky, které obsahují všechny laserové systémy. Jsou to aktivní prostředí, čerpací systém a rezonátor. Ty se dále rozdělují dle typu laseru, ale jejich fyzikální princip zůstává stejný.



Obr. 8 Základní prvky laseru [25]

❖ Aktivní prostředí

Aktivní prostředí je látka schopná zesilovat jí procházející záření a určuje i jeho vlnovou délku. Obsahuje oddělené kvantové energetické hladiny elektronů, které mohou přecházet z vyššího do nižšího stavu, při současném vyzáření fotonu. V aktivním prostředí tedy vzniká stimulovaná emise, která je základem laserové technologie.

❖ Čerpací systém

Čerpací systém dodává energii aktivnímu prostředí. Umožňuje v něm dosáhnout tzv. populační inverze, kdy je vyšší energetická hladina obsazena více elektrony, než nižší.

❖ Rezonátor

Rezonátor je optická dutina, skládající se ze dvou zrcadel, obklopující aktivní prostředí. Napomáhá tak k dosažení vyššího počtu stimulovaných přechodů oproti spontánním. Svazek vycházející z aktivního prostředí se odráží od zrcadla zpět do aktivního prostředí, kde dává podnět ke vzniku další stimulované emise, a tím zesílí svazek. Po dosažení požadované intenzity záření opouští svazek rezonátor jedním ze zrcadel, které je polopropustné. Stabilita záření v rezonátoru závisí na poloměrech křivosti zrcadel a délce rezonátoru.

Mezi další součásti laseru patří chladicí systém, systém vedení paprsku, řídicí počítač, motorizované posuvy a roboti.

Od vzniku prvního laserového zařízení do současnosti prošla tato technologie obrovským vývojem. Dnes existuje pro průmyslové využití velké množství různých druhů laserů s rozdílnými vlastnostmi.

Lasery se nejčastěji rozdělují podle následujících parametrů:

❖ Aktivního prostředí

- Plynové lasery
- Kapalinové lasery
- Pevnolátkové lasery
- Polovodičové lasery

❖ Vlnové délky zařízení

- Infračervené lasery
- Lasery viditelného pásma
- Ultrafialové lasery
- Rentgenové lasery

- ❖ **Režimu provozu**
 - Kontinuální
 - Pulzní
 - Impulsní
- ❖ **Typu čerpání**
 - Optické čerpání
 - Elektrickým výbojem
 - Injekcí nosičů náboj
 - Chemicky
 - Elektronovým svazkem
 - Tepelnými změnami
 - Rekombinací

1.4 Požadavky kladené na laserové zařízení [26], [56]

Vhodnost daného laserového zařízení pro určitou technologickou aplikaci nám ukazují některé jeho základní parametry, od kterých se odvíjí volba konkrétního laseru.

- ❖ **Výkon laserového záření**

Z pohledu technologických aplikací je hlavní především optický výkon laseru. Udává se, že jeho hodnota by měla být v rozmezí 1 až 30 kW středního výkonu v kontinuálním režimu.

- ❖ **Vlnová délka záření**

Vlnová délka laserového záření má přímý vliv na přesnost laserového obrábění - čím je kratší, tím vyšší přesnosti lze dosáhnout. Je tedy zřejmé, že v technické praxi je úsilí používat lasery s co nejkratší vlnovou délkou.

- ❖ **Rozbíhavost laserového svazku**

Ovlivňuje to, jak dobře můžeme pomocí optického systému zaostřit laserový svazek. Nejlépe lze zaostřit takzvané jednomódové laserové záření, zatímco u mnohamódových svazků je při použití stejné optiky minimální rozměr bodu mnohonásobně větší. A proto, tak jako u vlnové délky, je snaha používat laser s co nejmenší rozbíhavostí svazku.

- ❖ **Provozní náklady**

Pořizovací náklady, provoz (spotřeba energie, chladících kapalin a pomocných náplní), údržba a možnost inovace laserového zařízení by měly být logicky co nejnižší.

- ❖ **Účinnost laserového systému**

Hlavním zdrojem energie zpravidla bývá elektrický proud a tak je snaha používat takové lasery, které mají vysoký poměr elektrického napájecího výkonu k výkonu užitečného laserového záření.

- ❖ **Spolehlivost a stabilita laseru**

Nezbytnou podmínkou pro průmyslovou aplikaci laseru je jeho vysoká spolehlivost a odolnost proti vnějším vlivům. Především vůči otřesům, prachu, vlhkosti a změnám teploty. Laser musí spolehlivě pracovat v širokém rozsahu pracovních podmínek a v případě poruchy musí být bezpečně odpojen.

- ❖ **Ekologické a bezpečnostní faktory**

Moderní průmyslové lasery všeobecně přispívají ke zlepšení ekologických podmínek provozu, na druhou stranu je ale laserové záření velmi nebezpečné lidskému zdraví, a proto musí splňovat mnoho bezpečnostních a ekologických kritérií.

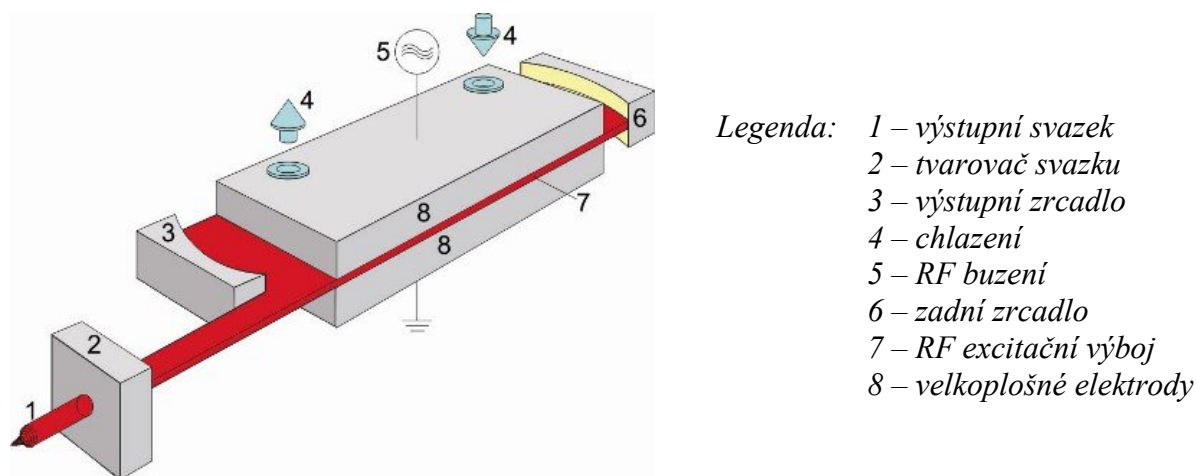
1.5 Lasery používané v průmyslu [46], [55]

V současné době je na trhu řada různých typů laserů. Liší se především svou konstrukcí, poskytovaným výkonem, účinností a charakterem výstupního svazku. Dnes se používá pět hlavních typů laserů. Jsou to Nd:YAG, CO₂, diskové, vláknové a diodové lasery. Jednotlivé lasery se dělí podle typu buzení, provozního režimu (kontinuální, pulzní) a dalších parametrů. Každý typ laseru má své výhody a nevýhody, jako i typické aplikace, pro které je vhodný. Tabulka porovnávající jednotlivé typy laserů a jejich vlastnosti se nachází na konci této kapitoly.

1.5.1 CO₂ laser [46], [55], [56]

CO₂ laser je plynový laser s aktivním prostředím vytvořeným směsí oxidu uhličitého, dusíku a helia. V průmyslu se používají lasery buzené radiofrekvenčně (RF) nebo elektrickým výbojem. Generovaná vlnová délka u tohoto typu laseru je nejčastěji 10,6 μm . Dle druhu proudění rozlišujeme CO₂ lasery s podélným nebo příčným prouděním pracovní látky. Výstupní svazek u laseru s podélným prouděním má vysokou kvalitu, a proto našel velké využití zejména pro řezání materiálů. Typ s příčným prouděním poskytuje méně kvalitní svazek, který se hodí spíše pro svařování. Avšak u tohoto typu je výrazně menší spotřeba plynů, tím pádem jsou náklady na jejich provoz nižší.

Základní princip CO₂ laseru ukazuje obr. 9. Čerpání aktivního plynu se uskutečňuje radiofrekvenčním vlněním, které prochází mezi dvěma elektrodami. Ty rovněž zajišťují díky své velké ploše difuzní chlazení plynu. Tyto lasery se vyznačují vysokou spolehlivostí, dlouhou životností a nízkými provozními náklady. Účinnost klasických CO₂ laserů je 8 % až 13 %. CO₂ lasery se využívají pro značení, gravírování a řezání nekovů (plastů, plexiskla, kůže, papíru, skla aj.). Zde jsou výkony do 1,5 kW. Pro průmyslové aplikace jako je řezání a svařování kovů se používají výkony až do 20 kW.

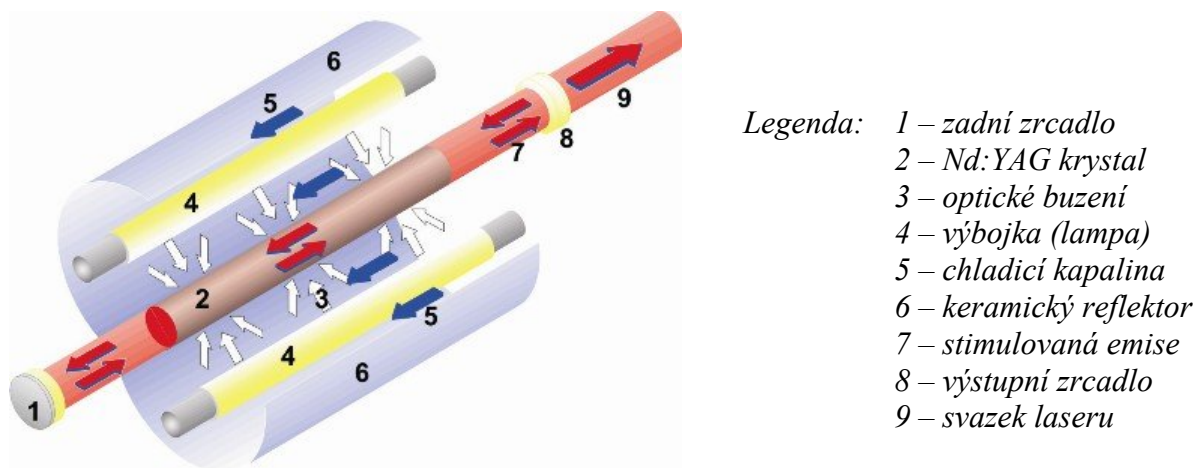


Obr. 9 Schéma SLAB laseru [46]

1.5.2 Nd:YAG laser [46], [55], [56]

Nd:YAG laser je pevnolátkový laser. Jako aktivní prostředí využívá opticky čerpaný Nd:YAG krystal (yttrium-aluminium-granát dopovaný ionty neodymu nebo ytterbia). V rezonátoru se generuje záření o vlnové délce 1,064 μm , a to v pulzním i kontinuálním režimu. V kontinuálním režimu dosahují tyto lasery průměrných výkonů stovek až tisíců wattů. V pulzním režimu disponují energií několika desítek joulů v jednom pulzu. K čerpání Nd:YAG laseru se používají buď výbojky (LPSS – lamp pumped solid state), nebo laserové diody (DPSS – diode pumped solid state). Ve srovnání s CO₂ lasery maximální výkony těchto typů laserů nedosahují takových hodnot. Na druhou stranu však poskytují kvalitnější a užší svazek, a proto disponují dostatečně vysokou hustotou výkonu.

Jeho hlavní výhoda spočívá v konstrukci. V porovnání s plynovými lasery je podstatně kompaktnější a údržba se prakticky omezuje jen na výměnu čerpacích výbojek. Další velkou předností je možnost vedení svazku optickým vláknem, což přináší značnou flexibilitu. Nevýhodou Nd:YAG laseru je celková účinnost, která dosahuje pouze 2 – 3 %, velký elektrický příkon a s tím spojená nutnost intenzivního vodního chlazení systému. Navzdory tomu má Nd:YAG laser širokou oblast použití, počínaje laserovým popisováním, přes řezání až po vrtání a sváření.

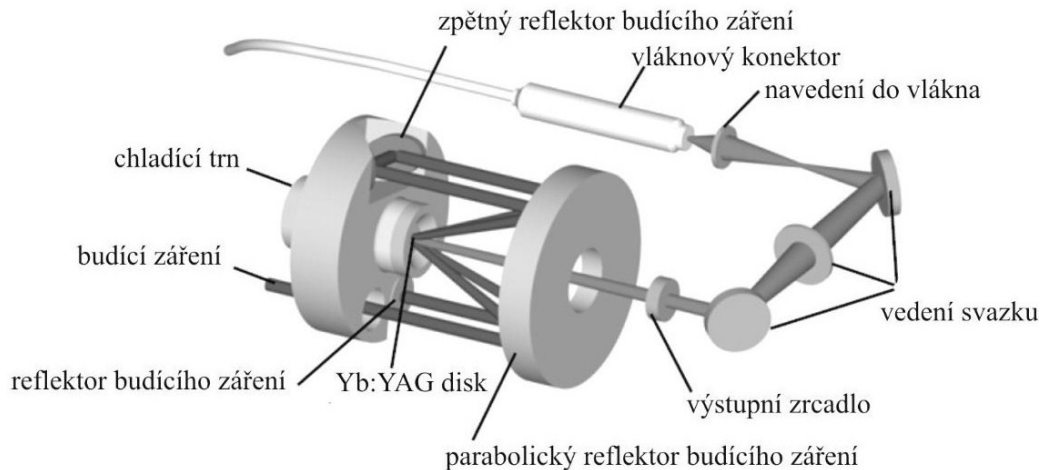


Obr. 10 LPSS Nd:YAG laser [46]

1.5.3 Diskový laser [46], [55]

Diskové, nebo také kotoučové lasery se řadí mezi pevnolátkové lasery a jsou jen modifikací Nd:YAG laserů. Rozdíl spočívá v aktivním prostředí, tvořeném maticí umělého YAG krystalu (yttrium-aluminium-granát) dopovaného ionty neodymu (Nd) nebo ytterbia (Yb), které má tvar tenkého disku (průměr 100 mm, tloušťka 0,25 mm). Vlnová délka diskových laserů je 1,070 μm . Čerpání se uskutečňuje vícenásobnými dopady záření diod přiváděným optickým vláknem. Zadní strana disku je připojena na chladič, který i při vysokých výkonech zajistí dostatečné chlazení vzduchem.

Výstupní svazek je vysoké kvality, jeho průměr je jen několik desetin milimetru, a je vázán do optického vlákna. Výkony u jednokotoučových laserů dosahují až 500 W. Je-li ale potřeba vyššího výkonu, je možné sériově zapojit více kotoučů do jednoho společného výstupního vlákna. Takto zesílený svazek má výkon několik kilowatt (až 16 kW). Celková účinnost u těchto typů laserů je kolem 20 %. Velmi úzký svazek pak umožňuje řezat a svařovat materiály větších tloušťek s nižším tepelným ovlivněním.



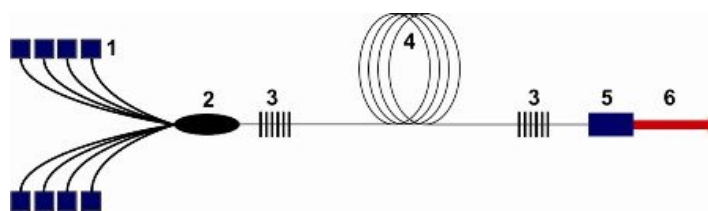
Obr. 11 Schéma diskového laseru [46]

1.5.4 Vláknový laser [42], [46], [55]

Vláknový laser je technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru. Aktivním prostředím u těchto laserů je křemíkové vlákno. Průměr jádra je několik mikrometrů, délka několik metrů a dopované je nejčastěji ionty erbia, ytterbia nebo thulia. Buzení z laserových diod je realizováno kolmo na průřez aktivního vlákna. Záření se dál šíří pomocí odrazů od vnitřní strany pláště do rezonátoru, který tvoří

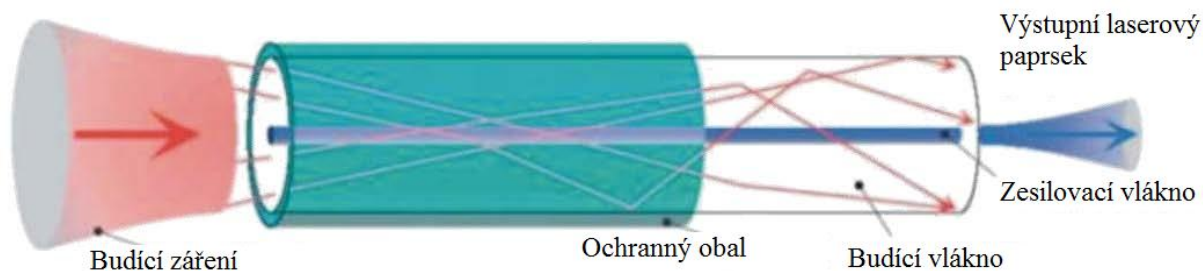
Braggovy mřížky nebo dichroická zrcadla. Chlazení se díky geometrii aktivního prostředí uskutečňuje prouděním vzduchu. Výkon jednovláknového laseru může být až 10 kW, což je u většiny průmyslových aplikací dostatečné. U aplikací požadující větší výkon, lze zvýšit spojením několika výstupních svazků do jedné společné výstupní čočky (dnes výkon až 80 kW). Avšak následkem tohoto zvyšování výkonu se zvyšuje i rozbíhavost svazku a snižuje jeho kvalita.

Zásadní předností vláknového laseru jsou jeho jednoduchost, vysoká účinnost (30 – 35 %) a modularita. Mezi další výhody patří vysoká životnost (až 100 000 h), malé prostorové nároky, vysoká kvalita laserového paprsku, nejnižší provozní náklady ze všech uvedených typů a prakticky nulové nároky na údržbu.



Obr. 12 Schéma vláknového laseru [46]

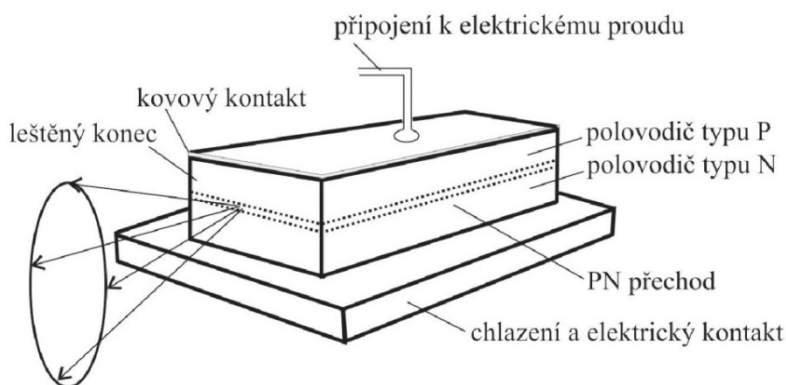
Legenda: 1 – budicí diody, 2 – optická spojka, 3 – Braggova mřížka, 4 – optické vlákno, 5 – výstupní kolimátor, 6 – svazek laseru



Obr. 13 Vznik záření v optickém vláknu [42]

1.5.5 Diodový laser [46], [55]

Diodový (polovodičový) laser je dalším typem pevnolátkového laseru, kde aktivním prostředím laserové diody je polovodič buzený elektrickým proudem. Na jeho PN přechodu se generuje záření o vlnové délce 808 – 980 nm, které se šíří v rovině přechodu a opakovanými odrazy se zesiluje. Svazek vystupující z rezonátoru má velkou rozbíhavost, a proto je jeho kvalita ve srovnání s jinými typy laserů výrazně nižší. Laserové diody se slučují do řad, bloků nebo baterií v závislosti na požadovaném výkonu. Výkon jedné



Obr. 14 Schéma diodového laseru [55]

laserové diody dosahuje jen několika málo miliwattů, ale výkon u kompletního diodového laseru může být i několik kilowattů (10 kW).

Výhodou diodových laserů je jejich vysoká účinnost (50 – 60 %), nízká hmotnost, kompaktnost a možnost navázat svazek do optického vlákna. Pro velkou rozbíhavost našly využití především pro povrchové aplikace – svařování, navařování a kalení.

1.5.6 Srovnání jednotlivých laserů a jejich vlastností [46]

Základní porovnání vlastností, výhod a nevýhod v praxi běžně používaných laserových systémů ukazuje tabulka 1. V tabulce 1 můžeme také vidět pro jaké aplikace je daný typ laseru nejvhodnější.

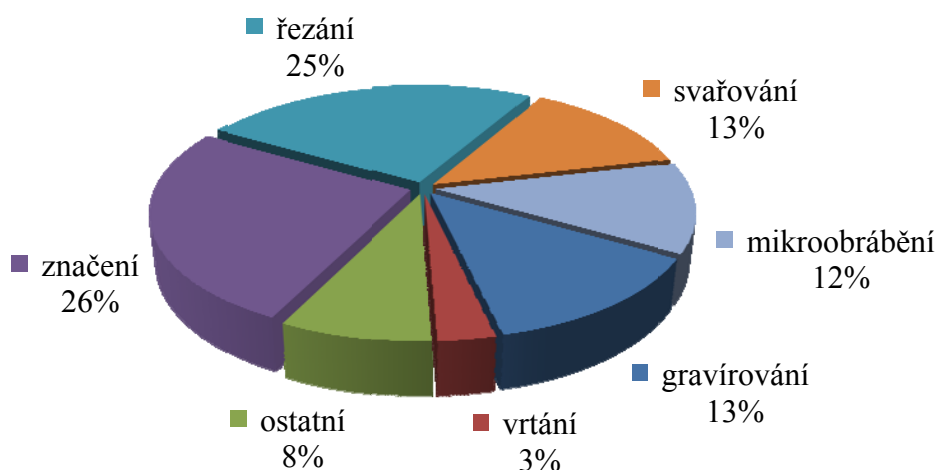
TAB. 1 Základní přehled průmyslových laserů [46]

Laser	Vlnová délka [nm]	Buzení	Účinnost	Režim	Výkon / Energie	Typické aplikace	Údržba	Životnost [h]
Nd:YAG	1064	LD	~7 %	CW	až 6kW	Ř, S	Ano	~10 000
				pulzní	~ mJ@ns(~100W)	Z, G		
		lampy	~3 %	pulzní	~ J@ms(~600W)	S, V		~1000
CO ₂	10 600	RF	~10 %	CW / pulzní	10 - 250W	Z,G,Ř nk	Ano	~20 000
					až 5kW(SLAB)	Ř, S		
		El.	~25 %		až 20kW(průtočné)	Ř, S		---
Diskový	1070	LD	~15 %	CW	až 16kW	Ř, S	Ano	~10 000
Vláknový	1070	LD	~30 %	CW	až 80kW	Ř, S	Ne	~100 000
				QCW	~ J@ms(~1,2kW)	Z,G,M		
				pulzní	~ mJ@ns(~100W)	Z,G,M		
Diodový	808-980	El.	~60 %	CW	až 10kW	S,K,N	Ne	~15 000

Legenda: U pulzních laserů se udává energie v pulsu a doba pulsu, případně střední výkon (v závorce), CW - kontinuální, QCW - kvazi kontinuální, Ř - řezání, S - svařování, Z - značení, G - gravírování, K - kalení, N - nanášení vrstev, M - mikroobrábění, nk - nekovů, LD - laserové diody, RF - radiofrekvenčně, El. - elektricky (výboj, proud).

2 PRŮMYSLOVÉ APLIKACE LASERU [3], [6], [56]

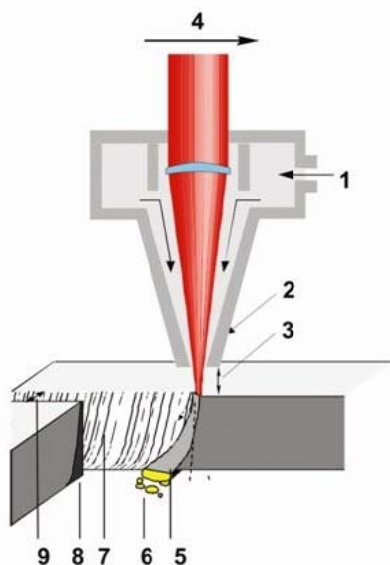
Od roku 1960, kde byly rubínové lasery využívány na vyvrtávání otvorů v diamantech pro průvlaky na tahání drátu, význam laserů v průmyslových technologiích neustále roste. Rozvoj laserových technologií dnes již dosáhl stádia, že v mnoha případech jej už vůbec nelze nahradit jinými metodami. Využitím jedinečných vlastností laserového záření lze dále zefektivňovat řadu průmyslových aplikací při dodržení vysoké kvality, opakovatelnosti a snížení výrobních nákladů. Současné laserové systémy jsou prakticky bezporuchové a každý ze systémů má odlišné přednosti a předpoklady pro své využití. Laser se tak stal standardním nástrojem v oblasti dělení, spojování, obrábění, vrtání, při opracování povrchů, při čištění a kalení kovových i nekovových materiálů.



Obr. 15 Přehled využití laseru v průmyslu [6]

2.1 Řezání laserem [24], [28], [41], [47], [48], [56]

Při laserovém řezání je snahou co nejrychleji lokálně odstranit materiál za pomoci energie laserového paprsku při zachování co nejmenší tepelně ovlivněné oblasti. Působením fokusovaného laserového svazku na obrobek se jeho materiál tak prudce zahřeje, že se roztaví nebo odpaří. Pro proniknutí celým obrobkem, se laserový paprsek začíná pohybovat podél obrysů součásti a plynule roztavuje materiál - řeže. Taveninu z řezu obvykle vyfukuje proud plynu směrem dolů. Plyny slouží i k ochlazení okolí řezu. Rychlost řezání, tvar a hloubka řezu závisí na výkonu laserového systému, fokusaci svazku a druhu řezaného materiálu (např. 20 mm ocelový plech – průměrný výkon 5 kW, řezná rychlost 1 m/min). Kvalita řezu je vynikající, hrany jsou kolmé a bez okují, není tedy nutné další opracování.



Obr. 16 Princip řezání laserem [47]

- Legenda:
- 1 – technologický plyn
 - 2 – tryska
 - 3 – vzdálenost trysky
 - 4 – řezná rychlost
 - 5 – roztavený materiál
 - 6 – struska
 - 7 – drsnost
 - 8 – tepelně ovlivněná oblast (TOO)
 - 9 – šířka řezu

Odpad je při tomto způsobu dělení minimální, protože šířka řezu se pohybuje v rozmezí od několika desetin do jednoho milimetru. Díky vysoké automatizaci procesu řezání laserem je možné vytvářet velmi komplikované tvary řezu a lze řezat velmi široké spektrum materiálů (kovy, keramika, plasty, sklo, dřevo, textilie, kůže atd.).

❖ Tavné řezání

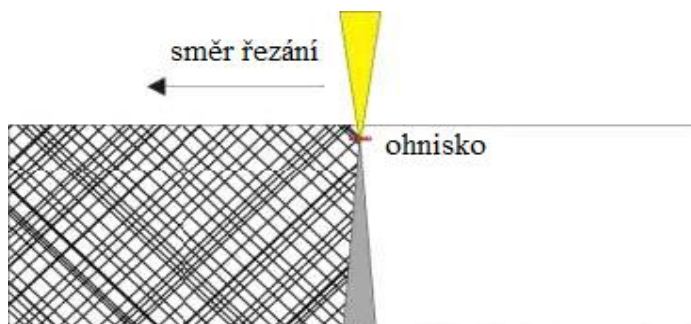
U tavného řezání laserem slouží jako řezací plyn dusík nebo argon. Plyn je vháněn do řezu pod tlakem 2 až 20 barů. Argon a dusík jsou inertní plyny a na vlastním procesu řezání se nepodílí, ale pouze jej vyfukují ven směrem dolů. Hrany jsou chráněny inertním plynem a neoxidují, řez je kvalitní a hrany se nemusí dodatečně obrábět. Nevýhodou tavného řezání je velká spotřeba řezného plynu, nižší řezná rychlost a potřeba vysokého výkonu laseru. Tento způsob je vhodný pro dělení nerezových ocelí a barevných kovů.



Obr. 17 Fokuse svazku při tavném řezání [41]

❖ Oxidační řezání

Oxidační metoda řezání se používá pro dělení běžných a konstrukčních materiálů. Na místo inertního plynu je používán kyslík. Materiál se zahřeje na zápalnou teplotu a dojde k exotermické reakci, která podporuje proces řezání. To umožňuje zvýšit řeznou rychlost a snížit nároky na výkon laserového systému. Řez je horší kvality, s vyšší drsností a s okujemi, ale pro většinu aplikací to je dostačující.



Obr. 18 Fokuse svazku při oxidačním řezání [41]

❖ Sublimační řezání

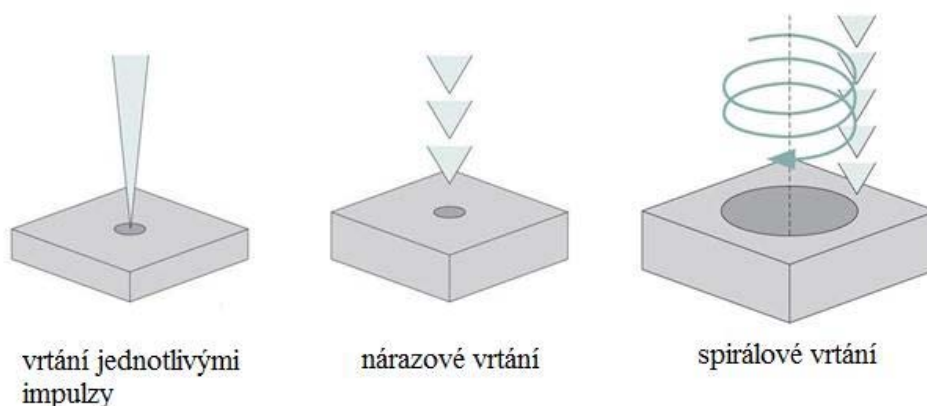
Při sublimačním řezání je materiál z místa řezu odpařován pokud možno bez tavení. Pára vytváří v místě řezu vysoký tlak, který expanduje a vymrští taveninu směrem nahoru a dolů. Jako asistenční plyn se používá dusík, argon nebo helium, který pouze chrání plochy řezu od okolního prostředí, aby neoxidovaly. Odpařování materiálů vyžaduje více energie než tavení, a proto u této metody dělení potřebujeme vysoký výkon laseru. Sublimační řezání vytváří kvalitní hranu řezu, ale je pomalejší než jiné řezací metody. Využívá se pro jemné řezání fólií, textilií a nekovových materiálů (dřevo, keramika, pěna), které se nemohou tavit.

2.2 Vrtání laserem [24], [32], [61]

Základní princip vrtání laserem spočívá na odpařování materiálu z místa vrtu. Pro tento účel jsou vhodné výkonné diodové pulzní lasery s délkou pulzu menší než 1 ms. Krátký impulz laseru s vysokou hustotou výkonu dopadajícího svazku na obrobek za velmi krátkou dobu způsobí, že se materiál taví a odpařuje. Při odpařování se zvětšuje objem materiálu a vzniká vysoký tlak, ten vypudí roztavený materiál ven z otvoru. Předností vrtání laserem je přesnost, rychlost, spolehlivost, stabilita procesu a možnost vytváření malých otvorů (od 0,1 mm) do různých materiálů. Vrtat lze kovy, plasty, dřevo, keramiku, sklo a jiné přírodní materiály.

U vrtání laserem máme možnost využití různých metod vrtání v závislosti na výkonu laseru a parametrech otvoru.

- Vrtání jednotlivými impulzy
- vytvoří otvor jediným impulzem (odpaření vrstvy až 6 mm).
- Nárazové vrtání
- otvor se vytvoří za pomoci série impulzů s nižším trváním impulzu a menší energií impulzu. Vhodné pro hlubší a přesnější otvory.
- Trepanační vrtání
- laser vyvrtá počáteční otvor a poté jej zvětší přejížděním v několika zvětšujících se kruhových drahách. Používá se pro otvory větší než je průměr svazku.
- Spirálové vrtání
- nevytváří počáteční otvor, ale již od začátku jezdí po kruhové dráze a postupně se zavrtává do hloubky. Lze jím vytvářet velké a hluboké otvory o vysoké kvalitě.



Obr. 19 Ukázka některých metod vrtání laserem [61]

2.3 Svařování laserem [24], [52], [54]

Při laserovém svařování dopadá fokusovaný svazek o vysoké plošné hustotě výkonu (až 10^7 - 10^9 W/cm²) na stykovou plochu dvou dílů, kde dojde k jejich svaření. Na 1 cm délky sváru činí spotřeba energie asi 1 kJ (elektronový svazek – 2 kJ, elektrický oblouk – 22 kJ, acetylen-kyslíkový oblouk – 52 kJ), což má za následek velmi malou tepelně ovlivněnou oblast. Ke svařování se využívá převážně pevnolátkových (Nd:YAG, diskových, vláknových) popřípadě diodových laserů. Svařovat lze běžně svařitelné materiály (kovy a jejich slitiny, plasty, fólie), ale i materiály, které klasicky svařit nelze (kov + plast, kov + keramika).

Hlavní předností laserového svařování je vysoká kvalita sváru, vyšší hloubka průvaru (až 10 mm), podstatně nižší tepelně ovlivněná oblast, vysoká rychlost svařování, snadná automatizace, povrchový vzhled sváru a možnost svařování bez přídavného materiálu. Nevýhodou u svařování laserem jsou přísné požadavky na přípravu svařovaných dílů a ploch. Často je také zapotřebí použití asistenčních plynů (Ar, N₂, CO₂, He), které chrání optiku před poškozením a chladnouci taveninu před oxidací.

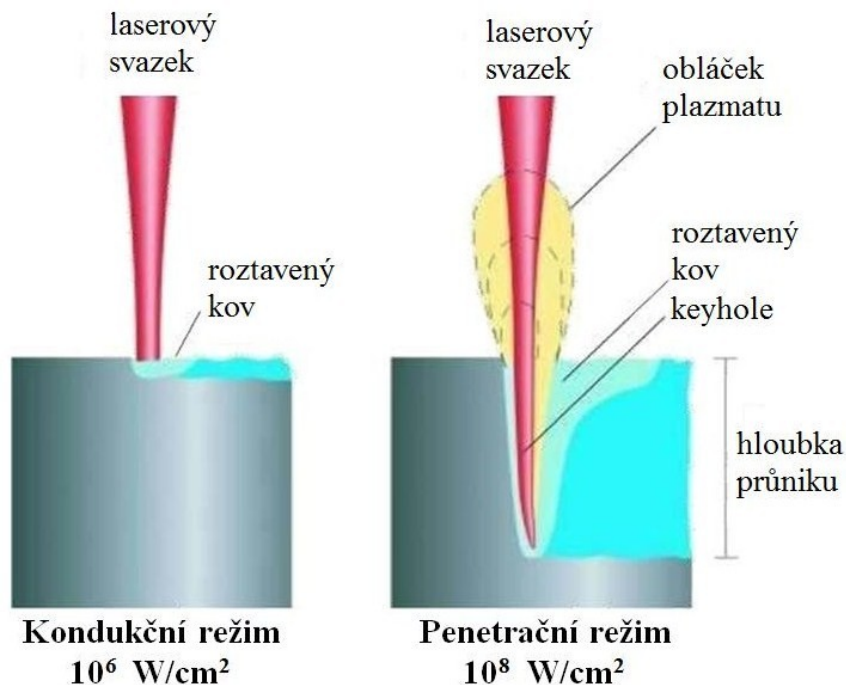
Rozlišujeme dva základní mechanismy laserového svařování:

❖ **Kondukční svařování**

Materiál se taví absorpcí a vedením tepla dopadajícím laserovým svazkem. Laser vytvoří hladký zaoblený svár o hloubce několik desetin milimetru až 1 milimetr. Šířka svaru je vždy větší než hloubka svaru. Kondukční svařování se využívá ke spojování fólií, tenkostěnných součástí nebo v elektronice.

❖ **Penetrační svařování**

Laserový paprsek taví kov a vytváří také páru. Při svařování vzniká úzká a hluboká kapilára (takzvaná „keyhole“). Kapilára je naplněna kovovými parami a obklopena roztaveným materiálem, který ji při pohybu paprsku začne obtékat a na zadní straně tuhnout. Vznikne úzký svár s vysokým podílem hloubka/šířka. Použití u svařování vícevrstvých materiálů a v případech, kdy jsou požadovány velké hloubky sváru.



Obr. 20 Metody svařování laserem [52]

2.4 Kalení laserem [29], [30], [56]

Laserové kalení se řadí k procesům povrchového kalení. Používá se výhradně u železných materiálů (oceli a litiny s podílem uhlíku více než 0,2 %), u kterých je požadována velká povrchová tvrdost při zachování velké houževnatosti jádra. Houževnatosti materiálu se dosahuje popouštěním, tj. pomalým ochlazením po ohřevu na popouštěcí teplotu. Tvrdost naopak získáme rychlým ochlazením z kalící teploty. Při běžném tepelném zpracování s rychlým ochlazením roste křehkost jádra materiálu, zatímco působením laserového svazku na materiál se zakalí jen malá povrchová vrstva bez prohřátí jádra, které si tak zachová svou houževnatost. Laserový paprsek zahřeje povrchovou vrstvu většinou těsně pod bod tání (na 900 až 1400° C). Pohybem laserového paprsku ve směru kalení je tepelně ovlivněná vrstva povrchu velmi rychle ochlazována okolním materiálem. Díky rychlému ochlazení vznikne nová velmi tvrdá struktura jemného martenzitu. Nejčastější hloubky povrchového kalení laserem jsou od 0,1 mm do 1,5 mm, u vybraných materiálů 2,5 mm a více. K procesům povrchového kalení se obvykle používají diodové nebo vláknové lasery o relativně nízkých výkonech v kontinuálním módu se široce roztaženým paprskem. Pro kalení menších ploch se používají impulsní lasery s energií svazku v desítkách joulů a délkou trvání impulzu několika milisekund. Výhodou laserového kalení je rychlost ohřevu, kvalita kaleného povrchu, zanedbatelná deformace součásti, lokální působení přesně do požadovaného místa, ovladatelnost a stabilita svazku. Kalení laserem se používá u velmi namáhaných součástí, jako jsou klikové a vačkové hřídele, ozubené kola, čepy, vodící lišty a další součásti.

2.5 Průmyslové značení, gravírování a mikroobrábění pomocí laserového paprsku [27], [33], [39], [40], [56]

Laserové značení má v současné době v průmyslových aplikacích obrovské zastoupení. Tato technologie umožňuje vytváření trvalého grafického nebo jakéhokoli jiného motivu na povrchu značeného předmětu. Motiv vzniká tepelným působením laserového paprsku, který odstraňuje nebo modifikuje



Obr. 21 Ukázka laserového značení [27]

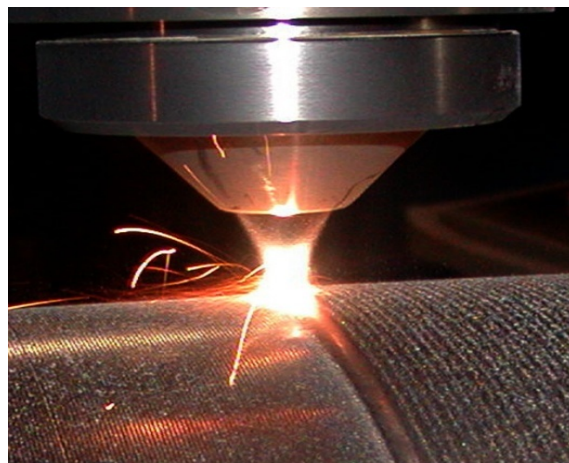
vrstvu materiálu určité tloušťky. Paprsek tak s vysokou přesností vytváří na povrchu materiálu stálý, mechanicky odolný, velmi kontrastní a jinak nenapodobitelný popis. Vše se obejde bez použití chemických přísad, inkoustu nebo mechanických zásahů do struktury materiálu. Označit lze prakticky jakýkoliv kovový i nekovový materiál (železné a neželezné kovy, dřevo, sklo, papír, lepenka, keramika, plasty, kůže atd.). Povrch značeného výrobku může mít libovolný tvar a různou povrchovou úpravu (broušený, pískovaný, lakovaný atd.).

Při změně parametrů laserového svazku je možné spojitě přecházet od povrchového značení materiálu v několika mikronové vrstvě (zlomky milimetru) až po laserové gravírování do větší hloubky (desítek milimetrů). Ke značení se používají jak CO_2 , tak pevnolátkové lasery. Vždy záleží jen na druhu popisovaného materiálu. Předností laserového značení je nesmazatelnost, bezkontaktnost, reprodukovatelnost, rychlost značení, kvalita a ostrost popisu, ekonomická nenáročnost provozu a prakticky neexistuje žádné omezení z hlediska složitosti výsledného popisu.

Laserové mikroobrábění nachází v poslední době velké uplatnění především v nástrojářství, elektronice, fotonice a medicíně. Základem pro mikroobrábění jsou ultra krátké pulzy (v řádech pikosekund) o nízké vlnové délce, které vytvářejí tak vysokou energii, že se materiál přímo odpařuje. Krátký impuls vytvoří v materiálu malou prohlubeninu o velikosti několika mikrometrů. Vhodným geometrickým uspořádáním (strukturováním) těchto pulzů na povrchu materiálu lze cíleně změnit jeho technické vlastnosti. Používají se pevnolátkové i plynové excimerové lasery. Metoda se využívá jen u kovových materiálů a její výhodou je rychlost, přesnost a spolehlivost při obrábění. Další vývoj laserů se v této oblasti zaměřuje na získání stále kratších pulzů a vlnové délky až femtosekundových laserů.

2.6 Laserové navařování [31], [58]

S rychlým rozvojem laserových aplikací, získalo laserové zpracování materiálu větší význam v různých odvětvích. Automobilový průmysl, letectví, námořnictvo, obrana a mnoho dalších oblastí využívá laserovou technologii. V poslední době získalo značnou pozornost i laserové navařování díky své rozmanité možnosti zpracování materiálu jako je pokovování, vysoce kvalitní oprava součástí, konstrukce prototypů (vrstvení jednotlivých návarů na sebe) a umožňuje i malý objem výroby.



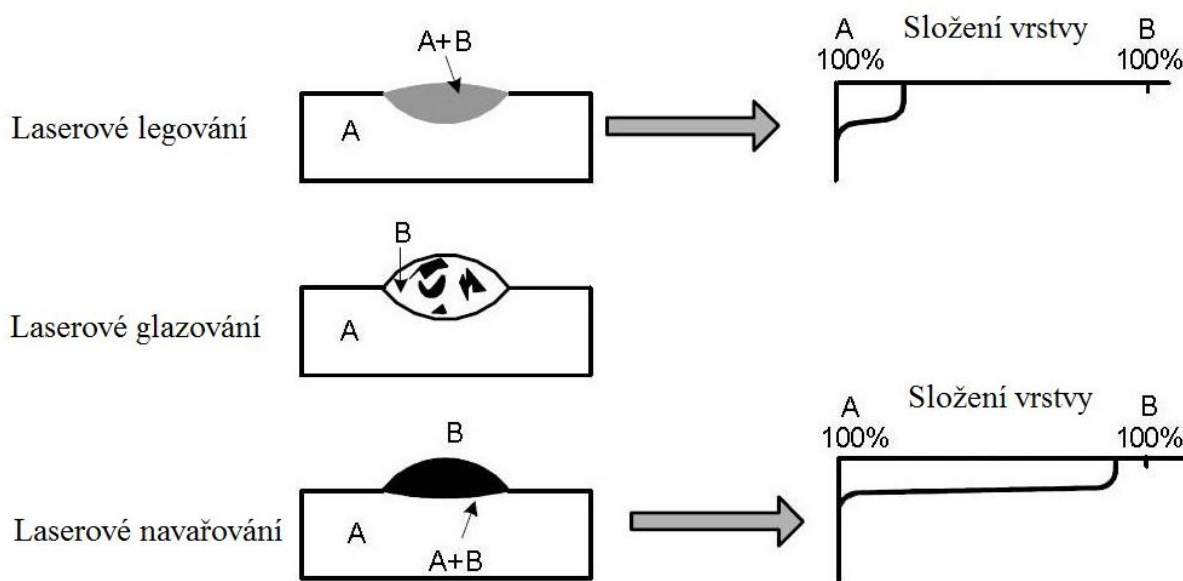
Laserový návar vzniká v důsledku působení laserového paprsku na pokladový materiál. Obr. 22 Příklad laserového navařování [31]

Materiál se nataví a přidáním přídatného materiálu se vytvoří tenká vrstva návaru. Přídatný materiál může být do místa návaru přiveden podle druhu zvolené metody (rozeznáváme dvou nebo jednostupňový proces). Lze vytvořit vrstvy různých materiálových vlastností (korozivzdorné, kluzné, odolné proti otěru, atd.) s tloušťkou v rozmezí 0,05 mm až 2 mm a tenké 0,4 mm. Po navaření se materiál obvykle obrábí nebo brousí do požadovaného tvaru.

Technologie laserového navařování umožňuje oproti ostatním metodám povrchových úprav vytvářet povlaky s minimálním zředěním, deformací a lepší kvalitou povrchu. Metoda je vhodná pro opravy licích a lisovacích forem, ozubených kol, k ochraně vysoce namáhaných dílů a prodloužení jejich životnosti.

2.6.1 Rozdíly mezi laserovým navařováním, legováním a glazováním [49], [58]

Přidáváním prášku do tavné lázně můžeme na povrchu součásti vytvořit tři různé produkty v závislosti na typu a množství přídatného materiálu. V závislosti na dosaženém stupni promíchání základního a přídatného materiálu v povrchové vrstvě, je možné rozlišit laserové legování a glazování na straně jedné a laserové navařování na straně druhé. První skupina se vyznačuje úplným nebo částečným promícháním přidaného materiálu se základním materiálem. U laserového navařování se vytvoří povrchová vrstva, která jen stěží obsahuje prvky základního materiálu. Zředění je proto jen takové, aby umožnilo dosáhnout dostatečně silného spojení materiálů. Potom vlastnosti takto vytvořené vrstvy závisí pouze na vlastnostech přídatného materiálu. Obr. 23 schematicky znázorňuje průřez povlakovanou vrstvou pro tyto tři procesy.



Obr. 23 Rozdíl v mikrostruktuře při laserovém legování, glazování a navařování [58]

2.6.2 Metody laserového navařování [13], [49], [58]

V zásadě existují dvě různé techniky pro laserové navařování využívané v praxi, dvoufázový proces a jednofázový proces. U dvoufázového procesu se předem na povrch základního materiálu umístí přídatný materiál. Ten se pak při působení laserového svazku taví i s podkladem. Při jednofázovém procesu se přídatný materiál přivádí přímo do tavné lázně na povrchu základního materiálu. Metody laserového navařování jsou znázorněny na obrázku 24.

❖ Dvoufázový proces navařování

Proces předem umístěvaného přídatného materiálu na povrch základního materiálu je jednoduchá metoda používaná pro nanášení povlaků a vytváření prototypů. Aplikované prášky jsou stejné jako u jiných metod navařování. Prášek však musí být smíchaný

s chemickým pojivem, aby bylo zajištěno, že se bude držet substrátu i během procesu navařování. Chemické pojivo se v průběhu procesu odpařuje, což může mít za následek pórovitost vzniklé vrstvy.

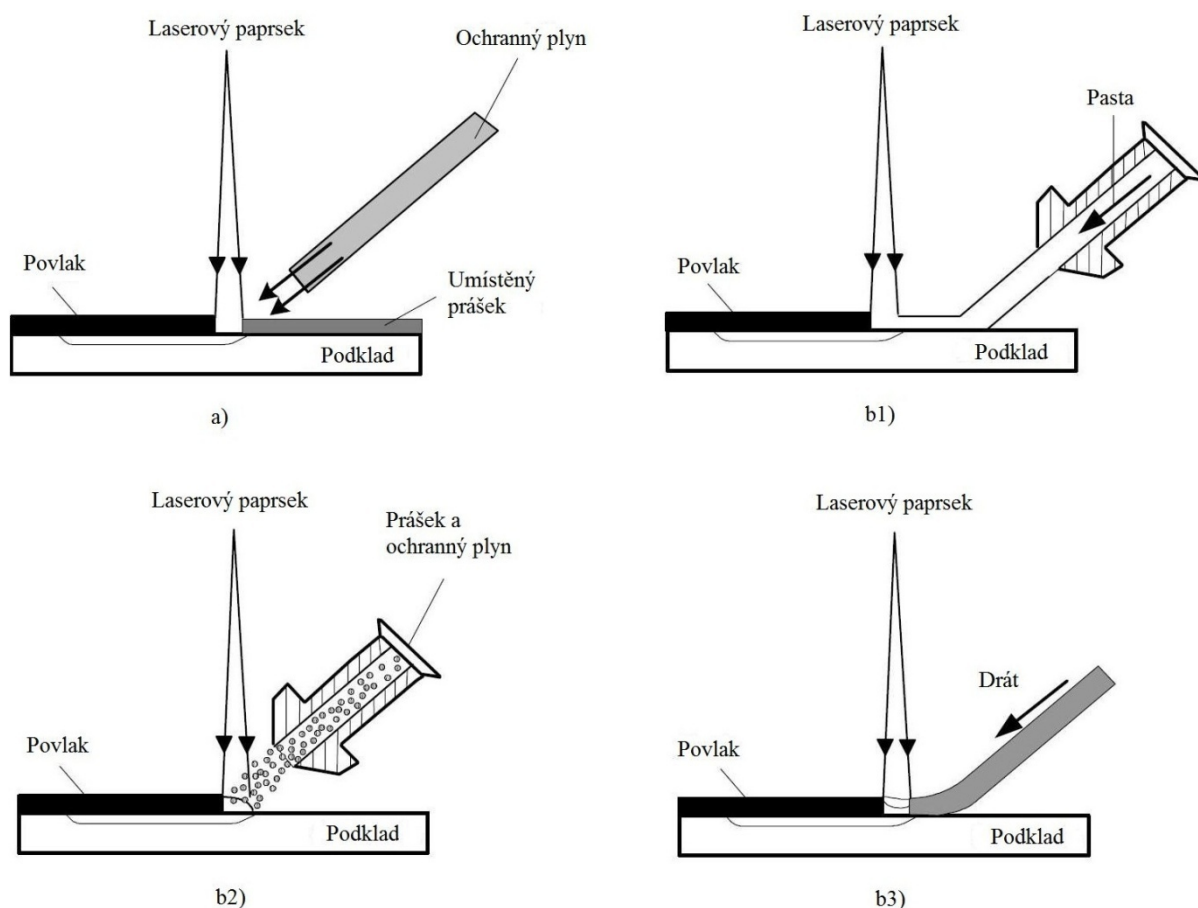
❖ Jednofázový proces navařování

U jednofázového procesu navařování působí laserový paprsek na základní materiál a taví ho. Současně se do taveniny přivádí přídavný materiál, který se smíchá s taveninou a po ochlazení vytvoří na povrchu součásti tenký kovový povlak. Podle způsobu podávání přídavného materiálu rozeznáváme tři druhy (vstřikování prášku, podávání drátu, vkládání pasty).

Podávání drátu se používá pro ruční opravy ploch a povlakování rotačně symetrických součástí, které mohou být povlakovány jednou nepřetržitou drahou. Důležité u této metody je přesné vedení a dávkování drátu, aby nedocházelo k ucpání tavné lázně drátem. Používají se dráty z různých materiálů (ocel, hliník, měď) o průměru 0,15 mm až 1,0 mm.

Pasta tvořená navařovacím práškem s vhodným pojivem se pokládá na základní materiál obvykle kousek před laserový paprsek. Je třeba dbát na to, aby byl navařovací čas krátký, jinak se tepelným působením vysuší pojivo obsažené v pastě a práškové částice odnese ochranný plyn.

Vstřikování prášku je nejběžnější a nejlepší metoda povlakování materiálu. Prášek je vyfukován tryskou společně s ochranným plynem a není v přímém kontaktu s taveninou. Paprsek může projít proud částic a nehrozí přerušení tavné lázně.



Obr. 24 Metody laserového navařování: a) dvoufázové navařování, b) jednofázové navařování, zahrnující b1) vkládání pasty, b2) vstřikování prášku, b3) podávání drátu [58]

2.6.3 Vlastnosti navařených vrstev [49], [58]

Vlastnosti navařených vrstev se zařazují do čtyř skupin (tab. 2). Některé z těchto vlastností mohou být vzájemně propojené. Odolnost proti opotřebení může být ovlivněna například tvrdostí, mikrostrukturou, počtem trhlin a jejich hloubkou a směrem, vazbou mezi přídavným materiálem a substrátem, atd.

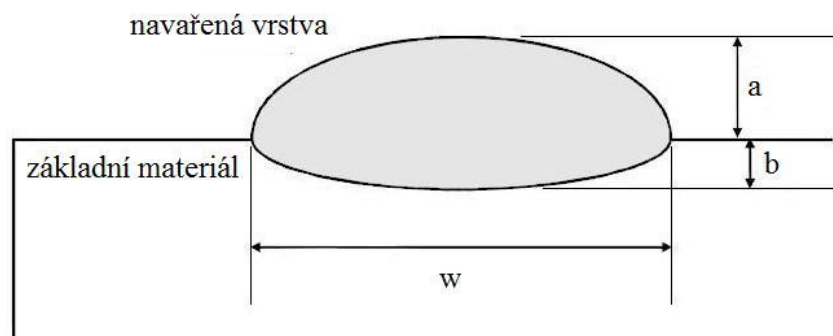
V praxi je obtížné vytvořit vrstvu, která splňuje veškeré požadavky. Obvykle je třeba nalézt rovnováhu mezi několika vlastnostmi. Příkladem je snížení vzniku trhlin ve vrstvě přehříváním substrátu. Přehřev sníží rychlost ochlazování a výsledné zbytkové napětí. V důsledku toho se předejde vzniku trhlin, ale zároveň se sníží i tvrdost navařené vrstvy. Předcházení trhlinám je důležité, protože trhliny podporují vznik korozních zlomenin a snižují únavovou pevnost.

TAB. 2 Vlastnosti navařených vrstev [49]

geometrické vlastnosti	mechanické vlastnosti	materiálové vlastnosti	kvalitativní vlastnosti
rozměry navařené vrstvy	odolnost proti opotřebení	odolnost proti korozi	pórovitost
zředění	zbytkové pnutí	zředění	praskání
drsnost povrchu	rozložení tvrdosti	velikost zrna	
	pevnost v tahu	stejnorodost	
		mikrostruktura	

❖ Zředění

Laserové navařování vyžaduje dosažení silné vazby mezi navařeným materiálem a substrátem, na kterém se tvoří tavenina. Hloubka této taveniny musí být tak malá, jak je to jen možné, aby se získala čistá povrchová vrstva, která není zředěná základním materiálem. Kvalitu návaru potom charakterizuje zředění prvků základního materiálu ve vytvořené vrstvě. Zředění je možno měřit dvěma způsoby. První metoda je založena na geometrii navařené vrstvy (obr. 25). Zředění je pak definováno jako poměr hloubky substrátu, který byl roztaven v průběhu navařování a celkové výšky navařené vrstvy. Tento geometrický přístup však předpokládá homogenní strukturu v průřezu návaru. Druhá metoda je založena na analýze složení materiálu v navařené vrstvě. Tato metoda má přednost před geometrickou metodou, protože umožňuje určit zředění po celé hloubce návaru. Zředění se zvyšuje s rostoucím výkonem laseru, ale klesá s rostoucí rychlostí pojezdu.



Obr. 25 Průřez navařenou vrstvou s definicí geometrie: výška návaru (h), hloubka návaru (b), šířka návaru (w) [49]

$$\text{zředění} = \frac{b}{a + b} ; \quad (1.1)$$

kde: b – hloubka substrátu, který byl roztaven v průběhu navařování [mm],
 a – výška navařené vrstvy [mm].

❖ Pórovitost

Pórovitost může být způsobená z několika důvodů. Za prvé, to může být v důsledku vytvoření plynových bublin, které jsou uvězněny v tuhnoucí tavenině. Tento jev se dá snížit vibrací obrobku. Vibrace mají příznivý vliv i na snížení vnitřního pnutí a praskání. Za druhé, pokud tuhnutí probíhá v různých směrech, mohou být některé oblasti taveniny uzavřené. V těchto uzavřených oblastech se poté projeví smrštění. To způsobuje ve vrstvě pokles pevnosti v tahu a může vést až k vytvoření otvorů. Další druhy pórovitosti se vyskytují na rozhraní mezi substrátem a navařenou vrstvou. Takový druh pórovitosti může být způsoben přítomností drobné vady, například mastnoty, která ovlivňuje povrchové napětí, a tím brání správnému přilnutí povlakovaného materiálu k substrátu.

2.6.4 Druhy a vlastnosti přídavných materiálů [49], [58]

Laserové návary se používají ke zlepšení povrchových vlastností kovových součástí. K dispozici je široká škála komerčních kovových nebo keramických prášků. Tyto prášky byly vyvinuty pro aplikace stříkání plazmou nebo plamenem, ale jsou vhodné i pro použití v laserovém navařování. Přídavný materiál můžeme s ohledem na druh základního materiálu rozdělit do dvou skupin. První skupina obsahuje prášky určené pro ocelové substráty a ve druhé skupině se nacházejí neželezné kovy, jako jsou hliník a titan.

❖ Prášky pro ocelový substrát

Kobaltové prášky ("Stellity") jsou velmi populární s ohledem na zlepšení odolnosti vůči opotřebení mechanických částí. Tyto prášky jsou směsí kobaltu a dalších prvků, jako jsou nikl, chrom, wolfram, uhlík a molybden. Chrom se přidává, aby vytvořil karbidy a poskytl pevnost kobaltové matici, stejně jako zvýšil odolnost vůči korozi a oxidaci. Wolfram a molybden také vytvoří tvrdé a křehké karbidy a nikl se přidává pro zvýšení tažnosti. Převládající karbid, který můžeme ve Stellitu najít, je karbid chromu. Tento karbid je zodpovědný za tvrdost a odolnost proti opotřebení vytvořené vrstvy. Karbid wolframu zase zvyšuje odolnost vůči otěru. Největší využití z kobaltových prášků našel typ Stellite 6. Ten může být aplikován například na zápusky, ventily a lopatky turbín. Pracovní teplota je omezena na 500° C.

Prášky na bázi niklu jsou vhodné pro součásti, které jsou vystaveny agresivnímu prostředí za vyšších teplot. Mají dobrou odolnost vůči vysokoteplotní korozi a oxidaci. Prvky běžné ve směsi s niklem jsou chrom, bór, uhlík, křemík a hliník. Tvorba tvrdých boridů a karbidu křemíku zlepšuje odolnost proti opotřebení a tvrdost. Nicméně, příliš velká přítomnost těchto tvrdých fází způsobí, že je poté povlak velmi křehký. Ke směsi niklových prášků se mohou přidávat karbidy wolframu, aby se dosáhlo zpevnění niklového roztoku. Přídavek bóru a křemíku zlepšuje smáčecí chování, a proto můžeme dosáhnout velmi hladkých povrchů. Prášky na bázi niklu mohou být používány jako náhrada za kobalt, což je poměrně vzácný prvek. Naproti tomu nikl je široce dostupný a mnohem levnější.

Přestože výběr prášků na bázi železa nemusí být jasnou volbou pro zlepšení povrchových vlastností ocelových substrátů, proběhl v této oblasti výzkum. Ten uvedl, že směs železa, chromu, uhlíku a manganu nebo wolframu má vynikající vlastnosti opotřebení ve srovnání se Stellite 6. Prvky, které se přidávají do železa, zajistí vytvoření karbidů, přispívají k odolnosti proti korozi a oxidaci, a podporují zesílení tuhého roztoku.

❖ Neželezné substráty

Slitiny na bázi niklu si udržují své mechanické vlastnosti i při vysokých teplotách a jsou odolné vůči korozi. Proto se hodí například pro výfukové potrubí velkých diesellových motorů u lodních pohonů, nebo pro lopatky proudových motorů. Nicméně, vlastnosti proti opotřebení nejsou u slitin niklu moc dobré. Odolnost proti opotřebení lze zlepšit použitím kobaltových slitin, nebo formou ochranných oxidických vrstev, jako je oxid chromu nebo oxid zirkoničitý. Oxidické vrstvy jsou nejen velmi tvrdé, ale zároveň tvoří tepelnou a chemickou bariéru mezi kovem a agresivním prostředím.

Slitiny hliníku a titanu jsou oblíbené materiály pro stavbu mechanických částí v leteckém a automobilovém průmyslu. Bohužel jejich mechanické vlastnosti a odolnost proti opotřebení za vyšších teplot nejsou nejlepší. Tyto vlastnosti lze zvýšit použitím niklových nebo hliníkových oxidických vrstev.

2.6.5 Doprava prášku [49], [58]

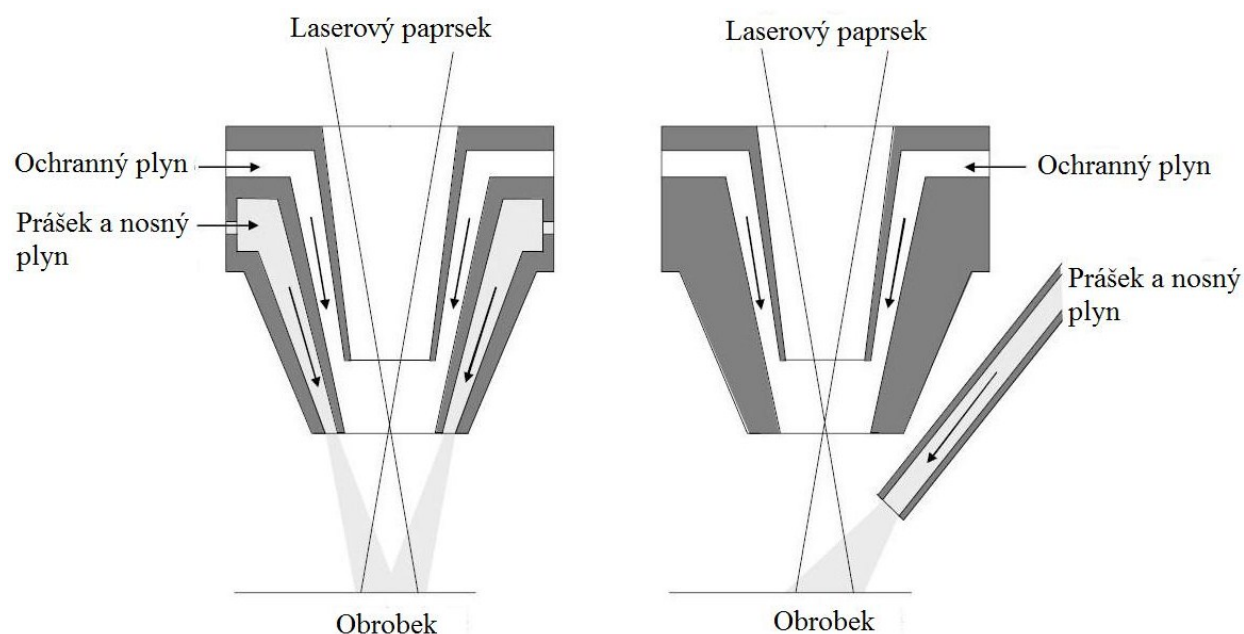
Prášek musí být dopraven z podavače do procesní oblasti. To může být provedeno použitím nosného plynu (argon, helium, dusík) nebo jednoduše gravitací. Následně je prášek nanesen na taveninu pomocí práškové trysky. Prášková tryska může mít několik konfigurací. Dvě základní uspořádání jsou zobrazeny na obrázku 26. V obou případech může být prášek předeheřán při průchodu tryskou, to aby se zvýšila účinnost procesu. Experimentální práce ukázaly, že prášková účinnost, což je poměr mezi uloženým práškem na substrát a dodávaným práškem ze zásobníku, je u koaxiální trysky výrazně menší než u bočního dodávání prášku.

❖ Koaxiální trysky

Vynález koaxiální trysky měl velký vliv na technologii navařování vrstev. Koaxiální dodávání prášku může být propojeno s optickým systémem. Výhodou koaxiální trysky je sousost dodávání prášku s laserovým paprskem a nezávislost na směru pohybu.

❖ Boční trysky

Boční dodávání prášku umožňuje ošetření všech druhů tvarů a uplatňuje se u specializovaných práškových trysek. V podstatě boční práškové trysky jsou jen trubky se správnou délkou, tvarem a průměrem.



Obr. 26 Koaxiální (vlevo) a boční (vpravo) tryska [49]

2.6.6 Srovnání laserového navařování s ostatními metodami povrchových úprav [49], [58]

Aplikace laserového navařování se můžou srovnávat s několika dalšími technikami povrchových úprav, jako jsou žárové nástřiky, klasické návary, CVD (Chemical Vapor Deposition) a PVD (Physical Vapor Deposition) povlaky. Tabulka 3 porovnává několik hlavních parametrů u těchto metod poskytujících výhody a nevýhody pro zpracování kovových i nekovových povrchů.

TAB. 3 Srovnání laserového navařování s ostatními metodami povrchových úprav [58]

Vlastnost	Laserové navařování	Klasické návary	Žárové nástřiky	CVD	PVD
Přilnavost	vysoká	vysoká	střední	nízká	nízká
Zředění	vysoké	vysoké	žádné	žádné	žádné
Povlakované materiály	kovy, keramika	kovy	kovy, keramika	kovy, keramika	kovy, keramika
Tloušťka vrstvy	od 50 μ m do 2mm	od 1 do několika mm	od 50 μ m do několika mm	od 0,05 μ m do 20 μ m	od 0,05 μ m do 10 μ m
Opakovatelnost	střední až vysoká	střední	střední	vysoká	vysoká
Tepelně ovlivněná oblast	malá	velká	velká	velmi malá	velmi malá
Ovladatelnost procesu	střední až vysoká	malá	střední	střední až vysoká	střední až vysoká
Náklady	vysoké	střední	střední	vysoké	vysoké

3 ZKOUŠKY TVRDOSTI [9], [36], [65]

Zkoušky tvrdosti se řadí mezi nejstarší a nejrozšířenější zkoušky kovů a ostatních materiálů používaných v technické praxi. Jde o zkoušky nedestruktivní, neboť funkční a vzhledové porušení je většinou bezvýznamné. Tvrdost je obecně definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Z tvrdosti pak můžeme usuzovat i některé další vlastnosti materiálu (pevnost v tahu, obrobitelnost apod.). Zkoušky se provádí buď na zkušebních vzorcích nebo přímo na hotových součástech.

Zkoušky tvrdosti rozdělujeme dle:

- principu měření (vtiskové, vrypové, odrazové),
- rychlosti zatěžování (statické, dynamické),
- účelu měření (zkoušky makrotvrdosti a mikrotvrdosti).

V této práci se zaměřím pouze na zkoušky vtiskové, protože jsou pro svoji přesnost, jednoduchost a dobrou reprodukovatelnost nejpoužívanější. Při této zkoušce se zatlačuje do materiálu zkoušeného vzorku velmi tvrdé těleso (kulička, kužel, jehlan) a měřítkem tvrdosti je velikost vzniklého vtisku (plocha, hloubka, úhlopříčka).

3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella [4], [10], [36], [65]

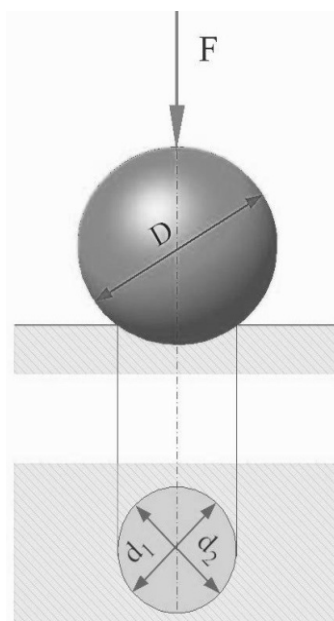
Tvrdost podle Brinella spočívá ve vtláčování tělesa (ocelové kuličky nebo kuličky z tvrdokovu o průměru D) do vyleštěné plochy zkoušeného vzorku silou F , která směřuje kolmo na povrch vzorku po stanovenou dobu. Po odlehčení zkušebního zatížení se změří průměr vtisku d .

$$\text{HBS(HBW)} = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} ; \quad (1.2)$$

kde: F – zkušební zatížení [N],
 D – průměr kuličky [mm],
 d – průměr vtisku [mm],
 koeficient $0,102 = 1 / 9,80665$.

Podmínky průběhu zkoušky je důležité dodržovat z důvodů srovnatelnosti naměřených výsledků. Na výsledek měření má vliv hlavně velikost zatížení, které se volí podle průměru použité kuličky a měřeného materiálu. Průměr vtláčované kuličky bývá 1, 2,5, 5, 10 mm a doba působení síly je u slitin železa od 10 s do 15 s, u neželezných slitin od 10 s do 180 s. Povrch zkoušeného vzorku musí být rovný, hladký, bez okují a nečistot, přičemž přesnost měření závisí především na správném proměření vtisku, avšak to bývá u této metody poměrně obtížné a nepřesné. Vtisk bývá mnohdy nezřetelný a nesouměrný. Zápis hodnoty z měření tvrdosti obsahuje číslo tvrdosti, symboly HBS nebo HBW a dále podmínky zkoušky v pořadí průměr kuličky, velikost zkušebního zatížení, doba působení zatížení v sekundách, liší-li se od doby stanovené normou (například 350 HBW 5/750).

Měření tvrdosti podle Brinella je z důvodu použití velkého průměru kuličky a vysoké zatěžující síly vhodné pro lité, heterogenní materiály (grafitické litiny) a měkké slitiny (duraly, mosazi).



Obr. 27 Zkouška tvrdosti podle Brinella [10]

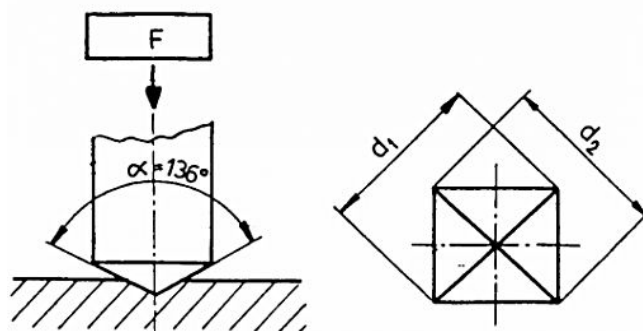
3.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [4], [36], [62], [65]

U zkoušky tvrdosti podle Vickerse se do zkoušeného materiálu vtlačuje pod zatížením silou F pravidelný čtyřboký jehlan o daném vrcholovém úhlu po stanovenou dobu. Po odlehčení zkušební zatížení se na povrchu vzorku měří úhlopříčka vtisku. Tvrdost podle Vickerse je potom vyjádřena jako poměr zkušební zatížení k ploše povrchu vtisku.

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{u^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{u^2}; \quad (1.3)$$

kde: F – zkušební zatížení [N],
 u – aritmetický průměr dvou délek úhlopříček d_1, d_2 [mm].

Používané vnikací těleso je stejné pro všechny metody Vickers. Těleso tvoří diamant ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou s vrcholovým úhlem $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Zkušební zatěžující síla se volí v rozmezí od 10 N do 1000 N a doba zatížení od 10 s do 180 s v závislosti na materiálu vzorku. Povrch vzorku musí být hladký, rovný, bez okujené vrstvy a cizích tělísek. Tuto metodu měření tvrdosti lze použít pro všechny tvrdosti, od nejměkčích kovů až po nejtvrďší kalené ocele. Zápis o měření obsahuje číslo tvrdosti a symbol HV s číslem odpovídajícím použitému zkušebnímu zatížení (například 814 HV 5).



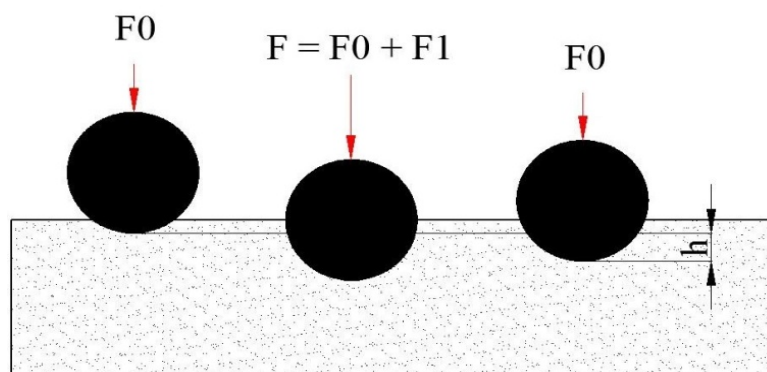
Obr. 28 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [62]

Výhodou této metody je, že naměřené hodnoty tvrdosti jsou velmi přesné, vtisky poměrně malé a metoda je minimálně závislá na zatížení. Hodí se zejména pro měření tvrdosti velmi tvrdých a homogenních materiálů a cementačních nebo nitridačních vrstev.

3.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella [4], [62], [65]

Tvrdost podle Rockwella se zjišťuje jako rozdíl hloubky vnikacího tělesa (diamantový kužel, ocelová kulička) mezi dvěma stupni zatížení (předběžného a celkového). Předběžné zatížení slouží k vyloučení nepřesnosti v povrchových plochách. Vrcholový úhel diamantového kužele je 120° a poloměr kulové části 0,2 mm (HRA, HRC). Kulička má průměr 1,5875 mm (HRB).

Diamantový kužel nebo ocelová kulička se nejprve zatíží silou 100 N a potom se postupně navyšuje zatěžující síla tak, aby se za 3 až 6 sekund dosáhlo zatížení předepsaného normou. Poté se opět zatěžující síla zmenšuje až na původních 100 N a v tomto stavu se zaznamená na stupnici přírůstek h hloubky vtisku, který nastal oproti výchozí poloze při 100 N. Výsledek měření tvrdosti podle Rockwella obsahuje čísla určující hodnotu tvrdosti a písmena HR s uvedením stupnice tvrdosti (například 59 HRC).



Obr. 29 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

U nás jsou normalizovány tři metody měření tvrdosti podle Rockwella.

- HRA – tvrdost určená diamantovým kuželem při celkovém zatížení 600 N, vhodné pro křehké materiály a tenké povrchové vrstvy.
- HRB – tvrdost určená ocelovou kuličkou při celkovém zatížení 1000 N, vhodné pro měkčí kovy.
- HRC – tvrdost určená diamantovým kuželem při celkovém zatížení 1500 N.

$$\text{HRA, HRC} = 100 - \frac{h}{0,002} ; \quad (1.4)$$

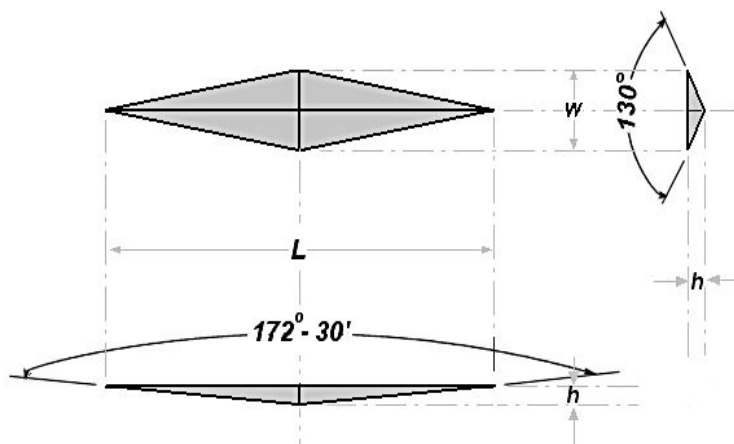
$$\text{HRB} = 130 - \frac{h}{0,002} ; \quad (1.5)$$

kde: h – hloubka vtisku indentoru [mm].

Tato metoda zkoušky tvrdosti je rychlá, snadná, nejméně přesná a vpichy jsou velmi malé (max. hloubka 0,2 mm). Je vhodná pro běžnou kontrolu velkých sérií, můžeme měřit tvrdost na jakémkoliv místě a nemusíme upravovat ani zarovnávat zkoušenou plochu.

3.4 Zkouška tvrdosti podle Knoop [4], [36], [37], [65]

Tato metoda byla navržena jako náhrada za metodu Vickers. Do povrchu materiálu se pod zatížením silou F vtlačuje čtyřboký diamantový jehlan. Jeho úhlopříčky jsou v poměru 7:1, vrcholové úhly jsou 130° a $172,5^\circ$ a poměr délky delší úhlopříčky k hloubce vtisku je 30. Otisk má tvar protáhlého kosočtverce a má malou hloubku. Na rozdíl od metody Vickers se zde používají menší síly a proměřuje se pouze delší úhlopříčka. Tvrdost je poté definována jako podíl zatěžovací síly a druhé mocniny delší úhlopříčky vtisku. Tvrdost se zapisuje například HK 0,5.



Obr. 30 Zkouška tvrdosti podle Knoop [37]

$$\text{HK} = 1,4509 \cdot \frac{F}{L^2} ; \quad (1.6)$$

kde: F – zkušební zatížení [N],
 L – délka delší úhlopříčky [mm].

Pro metodu měření tvrdosti podle Knoop jsou vyžadovány vysoké nároky na přípravu povrchu zkoušeného vzorku a na ostrost hran vnikacího tělesa. Tato metoda se hodí pro křehké materiály a tenké kovové vrstvy.

3.5 Zkoušky mikrotvrlosti [8], [37], [38], [65]

Termínem mikrotvrlost se nazývá tvrdost určená použitím velmi malých zatížení tak, aby vznikly vtisky nepatrné velikosti. Zkouška mikrotvrlosti se provádí například u povrchově kalených součástí, kdy můžeme po měření sestavit graf závislosti mikrotvrlosti na vzdálenosti od povrchu dané součásti. Při zkouškách měření mikrotvrlosti se do povrchu měřeného vzorku vtlačuje diamantové těleso tvaru Vickersova nebo Knoopova jehlanu. Rozsah zatížení se v tomto případě pohybuje od 1 g do 1000 g. Povrch zkoušeného materiálu by měl být na úrovni vyleštěného metalografického výbrusu, aby byla umožněna co nejvyšší



Obr. 31 Ukázka měření mikrotvrlosti [38]

přesnost měření. Mikrotvrlost nemůžeme měřit na obvyklých typech tvrdoměrů, neboť vyžaduje nesrovnatelně vyšší přesnost při zatěžování i při proměřování vtisku. Nejpřesněji lze měřit přímým zatěžováním pomocí závaží nebo přesně cejchovanou pružinkou. K proměření vtisku potom slouží přesná optika mikroskopů. Protože jsou vtisky při měření mikrotvrlosti malé, hodí se ke zkoušení malých nebo tenkých součástí, měření mikrotvrlosti strukturních složek, hodnocení svarových spojů, měření křehkých materiálů, atd.

4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ TENKÝCH VRSTEV A POVLAKŮ [44]

Tenkovrstvé materiály a struktury v dnešní době představují neodmyslitelné součásti velké řady technologických procesů a průmyslových aplikací. V oblasti zkoumání pevných látek bylo vyvinuto velké množství metod. Řada z nich představuje nástroje vhodné pro studium a testování tenkých vrstev a povrchů. Úplný popis jednotlivých metod využívaných při studiu tenkých vrstev přesahuje rámec této kapitoly. Proto se pokusím uvést jen základní metody a přístupy pro studium jednotlivých vlastností tenkých vrstev.

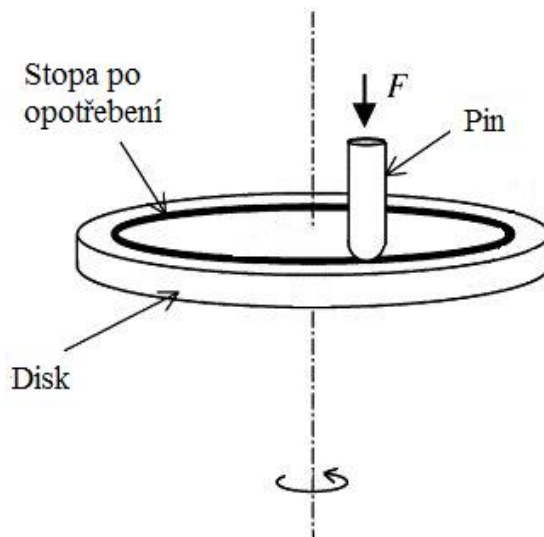
4.1 Metoda „Pin-on-disk“ [16], [43], [63]

Metoda „pin-on-disk“ se provádí na přístroji zvaném tribometr. Konstrukce tribometru zamezuje ovlivnění měření okolními podmínkami (teplota, tlak a vlhkost vzduchu), které se během experimentu sledují. Hlavní částí tribometru je pružné rameno, v němž je uchycen přípravek do kterého se vkládá pin tělísko (může to být kulička, čep, prstenec). Na tomto rameni lze zvolit zatížení pinu v rozmezí 0,25 N – 60 N. Součástí zařízení je i třecí snímač, který měřením odchylky pružného ramene určuje koeficient tření mezi pinem a diskem. Disk se může otáčet námi zvolenou rychlostí od 10 do 500 otáček za minutu.

Velikost opotřebení a průběh koeficientu tření ovlivňuje hned několik faktorů:

- mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu měřeného vzorku a pinu (velikost stykové plochy – geometrie pinu, stav a kvalita povrchu vzorku)
- okolní prostředí a přítomnost mazací látky
- teplota povrchu vzorku
- počet cyklů, eventuálně doba trvání testu
- relativní rychlost pohybu mezi kuličkou a vzorkem
- zatěžující síla.

Nejvíce ovlivňuje výsledky experimentu pin tělísko a jeho vlastnosti. Musí se proto před samotným experimentem stanovit jeho geometrie, a to z jakého materiálu by mělo být. Při zjišťování odolnosti tenké vrstvy proti abrazivnímu opotřebení je třeba použít tělísko z keramiky. To se vlivem vyšší mikrotvrdosti tenkých vrstev opotřebovává. U vyšších hodnot opotřebení (cca 400 μm) pin tělísko dochází k poklesu tlaku působícího na vzorek. Ten potom není dostačující k proniknutí tenkou vrstvou, což má za následek ovlivnění charakteru prováděného testu. Vypovídající hodnota experimentu bude vysoká ve spojení s vysokým zatížením a rychlostí. Aby však bylo možné vzájemně porovnávat jednotlivé vzorky, je důležité, aby podmínky ovlivňující experiment byly vždy shodné (zatížení, rychlost otáčení vzorku, vlhkost, teplota vzduchu, drsnost povrchu).



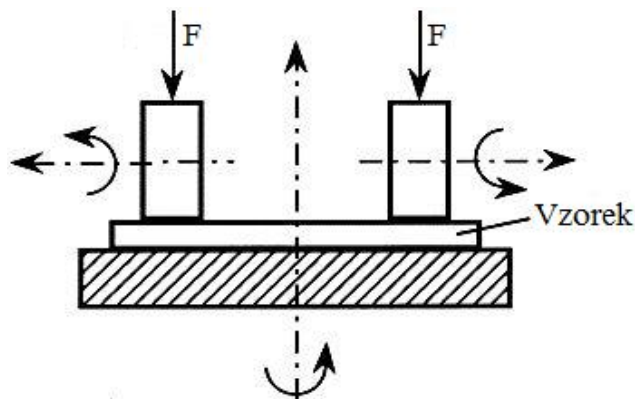
Obr. 32 Schéma metody „Pin-on-disk“ [43]

4.2 Metoda „Abrasion wheel test“ [1], [57], [64]

Přístroj pro metodu „Abrasion wheel test“ se nazývá Taber Abraser. U Taber Abraseru je testovaný vzorek umístěn na otáčivý stůl, který se během testu otáčí (60 – 72 otáček za minutu). Na vzorek během rotace působí dva brusné kotouče. Ty jsou zatíženy závažím (běžně 250 g, 500 g nebo 1000 g na každém kotouči) a jsou poháněny rotací vzorku vzhledem k vodorovné ose. Jeden brusný kotouč otírá vzorek ven směrem k obvodu a druhý zase dovnitř ke středu. Kotouče tak na povrchu vzorku vytvoří opotřebenou stopu ve tvaru kruhu. Výsledné znaky otěru tvoří vzor zkřížených oblouků v kruhové skupině, která pokrývá plochu přibližně 30 cm². Maximální tloušťka materiálů, které mohou být testovány, je 12,7 mm. Záleží ovšem i na typu přístroje.

Nezbytnou součástí při zkoušení materiálu touto metodou je volba brusného kotouče. K dispozici jsou jak standardizované, tak i speciální typy brusných kotoučů určených pro různé aplikace. Minimální použitelný průměr kotouče je 44,4 mm.

Existují různé techniky používané k hodnocení výsledků získaných na Taber Abraseru. Způsob hodnocení by měl odpovídat materiálu, který byl testován. Jako ukázkou uvádím pár příkladů běžných metod hodnocení výsledků z Taber Abraseru.



Obr. 33 Princip metody „Abrasion wheel test“ [1]

- Cykly potřebné k dosažení konkrétního koncového bodu

To je počet cyklů potřebných k dosažení předem stanoveného koncového bodu, nebo vzhledu, nebo stav vzorku po stanoveném počtu cyklů. Hodnotící kritéria mohou zahrnovat ztrátu meze pevnosti, zlomení, ztrátu povlaku, změna lesku, ztráta barvy nebo jiné změny ve vzhledu.

- Ztráta hmotnosti

Tato technika měří, kolik materiálu se odstranilo při otěru. Obvykle je uvedena v miligramech.

- Index opotřebení

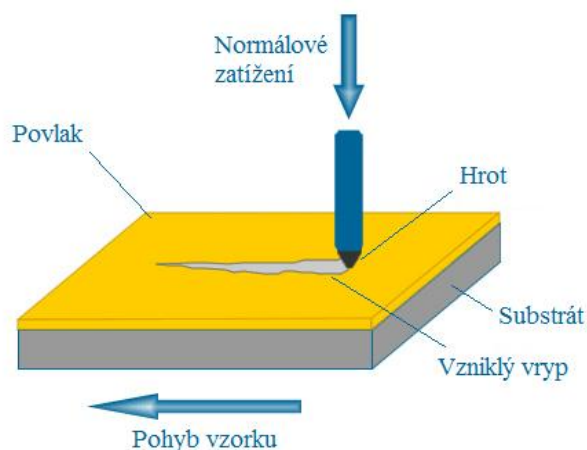
Udává míru opotřebení. To je vypočítáno na základě měření úbytku hmotnosti (v miligramech) na tisíc cyklů otěru. Čím je nižší index opotřebení, tím je odolnost materiálu proti otěru lepší.

Tato metoda zkoušení mechanických vlastností se používá pro testování širokého spektra materiálů (včetně plastů, různých povlaků, laminátů, kůže, papíru, keramiky, koberec, bezpečnostního zasklení, atd.).

4.3 Metoda „Scratch test“ [50], [51], [60]

Scratch test je základní a nejrozšířenější zkouškou pro zjištění adheze mezi tenkou vrstvou a substrátem. Princip metody spočívá v plynulém zatěžování hrotu ve směru kolmém na povrch vzorku. Vzorek se pohybuje konstantní rychlostí ve vodorovném směru a hrot, který je zatěžován konstantní nebo plynule se zvyšující silou, vniká do povrchu vzorku. Při tomto pohybu se vytvoří vryp. Na rozhraní, vrstva – substrát, se tak generuje pnutí, které při dosažení kritické hodnoty způsobí odtržení vrstvy od substrátu. Tato hodnota se nazývá kritické zatížení a používá se jako míra adheze dané vrstvy.

Jako materiál pro hrot se běžně používá Rockwellův diamant nebo tvrdý kov (WC). Kritické zatížení se dá změřit pomocí akustického senzoru připojeného k zatíženému ramenu, nebo se dá pozorovat pomocí vestavěného optického mikroskopu. Kromě akustické emise měří Scratch testery i použitou normálovou a tangenciální sílu a hloubku průniku. Tyto parametry poté spolu s údaji o akustické emisi vytvářejí mechanický popis zkoušené vrstvy. Metoda Scratch testu se



Obr. 34 Schéma „Scratch testu“ [51]

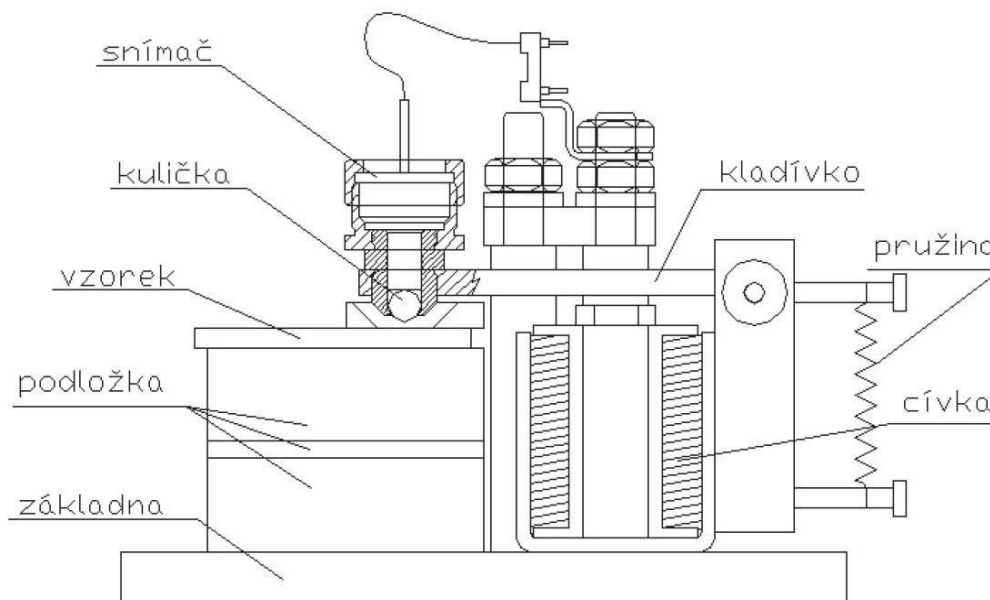
využívá hlavně ve výzkumu, vývoji a kontrole kvality.

4.4 Metoda dynamického rázového impaktoru [11], [14]

Pro zjištění příčin opotřebení dynamicky namáhaných povlakovaných součástí bylo třeba vyvinout jednoduchou dynamickou zkoušku, která by více odpovídala reálným podmínkám. Výše uvedené zkušební metody neodpovídají vzniklým stykovým podmínkám a jejich výstupní informace jsou nedostatečné. Proto byl sestaven impulsní tester, který pracuje na principu opakovaných dopadů tvrdé kuličky na rovinný vzorek.

❖ Popis a princip metody

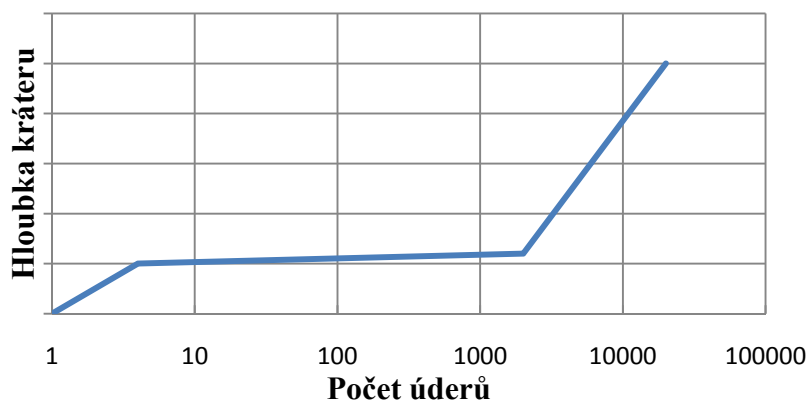
Mechanické uspořádání testeru je na obr. 35. Toto jednoduché uspořádání dovoluje měnit frekvenci a sílu dopadu kuličky na zkoušený vzorek. Testovací kulička má průměr 5 mm a její geometrie a velmi malá drsnost povrchu jsou garantovány výrobcem. Kulička je z wolfram – karbidu a dopadá na vzorek s měnitelnou silou 50 až 800 N a frekvencí 5 Hz až 10 Hz. Hlavním parametrem je nastavení vzdálenosti mezi kuličkou a vzorkem, neboť to ovlivňuje výslednou rychlost dopadu kuličky na vzorek. Přístroj je řízen počítačem, pomocí něhož se nastavuje síla a frekvence úderu.



Obr. 35 Mechanické uspořádání dynamického testeru [14]

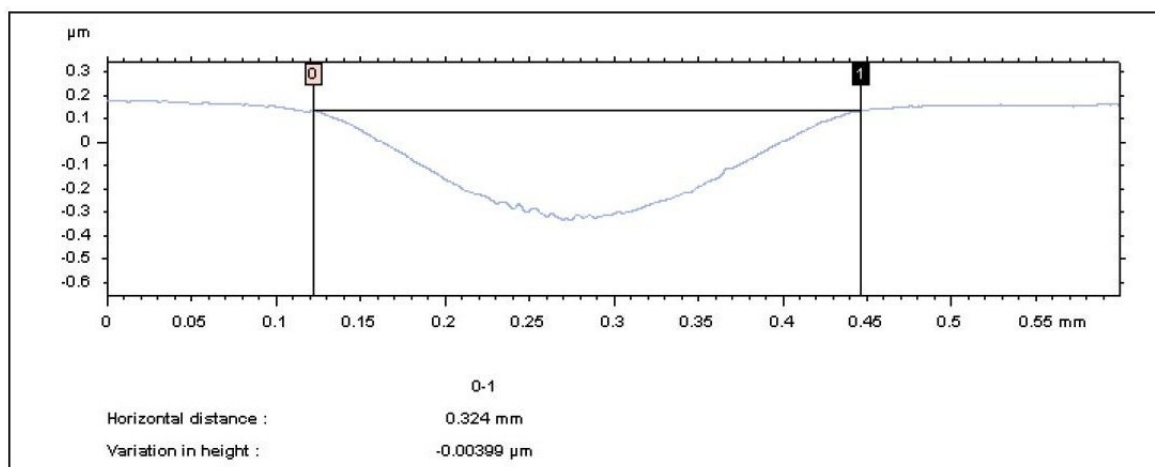
❖ Hodnocení dosažených výsledků

Výsledkem provedených testů jsou tzv. zátěžové křivky, které ukazují závislost parametru kráteru na počtu úderů, při kterém dojde k úplnému narušení povlaku. Postupné opotřebování a následné zničení zkoušeného povlaku můžeme odhadnout z naměřené závislosti hloubky nebo plochy řezu vznikajícího kráteru na počtu úderů při konstantní síle a frekvenci dopadu kuličky. Zátěžová křivka má tři charakteristické oblasti zatížení. Ty jsou dobře vidět na obecném průběhu křivky na obr. 36. Z těchto oblastí lze určit opotřebení, spolehlivost a kritické hodnoty zatížení systému vrstva – substrát během dynamického zatěžování.



Obr. 36 Obecný tvar zátěžové křivky [14]

Abychom mohli sestavit zátěžové křivky, musíme nejprve změřit velikost parametrů jednotlivých kráterů odpovídající určitému počtu úderů kuličky na vzorek a dané síle úderu. Charakteristickými parametry kráteru jsou hloubka kráteru, průměr kráteru, plocha řezu kráteru a objem kráteru. Ty mohou mít různou vypovídající hodnotu. Pro měření těchto parametrů je nejvhodnější použít profilometr.



Obr. 37 Příklad měření průměru kráteru na profilometru Talystep [14]

Dynamický tester otěru umožňuje zkoušky, které dávají možnost určit dynamickou zatížitelnost povlakovaných vrstev a substrátu s dostatečnou přesností. Dále můžeme stanovit meze dynamického zatížení, znaky únavy a charakter trhlin a zlomů během dynamického namáhání.

5 EXPERIMENT

Cílem experimentu je studium chování a porovnání povrchových vrstev vytvořených laserovým navařováním prášku při zkoušce odolnosti proti otěru pomocí dynamického rázového impaktoru. Materiál prášku pro jednotlivé vzorky dodala a navaření na substrát provedla firma MATEX PM, s.r.o., která se specializuje na využití laserové technologie v průmyslu, především na laserové kalení, navařování a svařování.

5.1 Charakteristika materiálů a příprava vzorků [12], [15], [45], [53]

Pro experiment byly zvoleny jako vzorky tři druhy prášku. Jednotlivé prášky se navařily na substrát, který byl pro všechny vzorky tentýž z důvodu reprodukovatelnosti a srovnání výsledků zkoušek. Parametry navařování byly také pro všechny vzorky stejné a vzorky byly navařeny následovně - navařovací výkon 1300 W, rychlost navařování 0,4 m/min a podávání prášku 15 g/min.

❖ Charakteristika nástrojové rychlořezné oceli ČSN 19 830 – substrát

Výkonná nástrojová ocel se zvýšenou houževnatostí a snadnější obrobiteľností při broušení. Oproti ostatním rychlořezným ocelím má vyšší náchylnost na oduhličení a zhoršenou tvárnost za tepla. Vhodná k obrábění materiálů se střední a menší pevností, především pro nástroje jako jsou např. různé druhy nožů, frézy, vrtáky, výstružníky, výhrubníky, závitníky a další. Dále se používá na nástroje pro stříhání za studena, tváření za studena, tváření za tepla a pro výrobu ručních nástrojů (pilové listy na kovy).

TAB. 4 Chemické složení oceli 19 830 [12]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	W	V
[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]
0,8 - 0,9	0,45	0,45	0,035	0,035	3,8 - 4,6	4,5 - 5,5	5,5 - 7,0	1,5 - 2,2

TAB. 5 Mechanické vlastnosti oceli 19 830 [12]

Tvrdost po tepelném zpracování HRC	Hustota [g/cm ³]	Mez kluzu [GPa]	Pevnost v ohybu [GPa]
65 - 66	8,1	3,5 - 3,6	4,4

❖ Charakteristika Stellite 6 – vzorek č. 1

Stellite 6 je kobaltová slitina odolná proti opotřebení, otěru a korozi. Je to nejrozšířenější otěruvzdorná slitina kobaltu a má vynikající odolnost vůči mnoha formám mechanické a chemické degradaci v širokém rozmezí teplot a udržuje si průměrnou úroveň tvrdosti až do 500 °C. Má také dobrou odolnost proti nárazu a kavitační erozi. Stellite 6 je ideální pro různé navařovací procesy a lze ji obrábět karbidovými nástroji.

TAB. 6 Chemické složení a vlastnosti prášku Stellite 6 [45], [53]

Co	C	Cr	Ni	Fe	W	Si	Tvrdost HRC	Hustota [g/cm ³]
[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]		
zakl.	1,1	28,5	2,8	1,5	4,4	1	36 - 45	8,44

❖ Charakteristika nástrojové oceli M2 – vzorek č. 2

Americkým značením AISI M2 (ekvivalent ČSN 19 830 viz substrát) se označuje nástrojová rychlořezná wolfram – molybdenová ocel, která je populární pro své všeobecné použití. V tomto případě byla nástrojová ocel M2 použita ve formě kovového prášku. Nástrojová ocel M2 nabízí vynikající kombinaci tvrdosti, houževnatosti a odolnosti proti opotřebení. Má široký rozsah tepelného zpracování a je vhodná k obrábění materiálů se

střední a menší pevností. Používá se pro nástroje jako jsou například nože, frézy, vrtáky, výstružníky, výhrubníky, závitníky a další.

TAB. 7 Chemické složení nástrojové oceli M2 [12]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	W	V
[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]
0,8 - 0,9	0,45	0,45	0,035	0,035	3,8 - 4,6	4,5 - 5,5	5,5 - 7,0	1,5 - 2,2

TAB. 8 Mechanické vlastnosti prášku z nástrojové oceli M2 [12],[45]

Tvrdost po navaření HRC	Hustota [g/cm ³]	Mez kluzu [GPa]	Pevnost v ohybu [GPa]
56 - 60	8,1	3,5 - 3,6	4,4

❖ Charakteristika směsi kovového prášku NiCrBSi + WC – vzorek č. 3

Tato prášková směs se vyznačuje vysokou odolností proti opotřebení a korozi, kdy jsou částice karbidu wolframu uloženy v niklové matici. Chrání komponenty, které se potýkají s těžkým mechanickým a minerálním opotřebením.

- Charakteristika kovového prášku z NiCrBSi

Tento prášek má po aplikaci vysokou odolnost proti opotřebení, korozi, odolává silnému otěru, vyšším teplotám a má také nízký koeficient tření. Použití na šrouby, šneková čerpadla, vodící válce, lopatky ventilátorů, atd.

TAB. 9 Chemické složení a vlastnosti kovového prášku NiCrBSi [15]

Ni	C	Cr	Fe	B	Si	Tvrdost HRC	Hustota [g/cm ³]
[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]		
zakl.	0,75	15	3,5	3,1	4,3	~ 52	8

- Charakteristika kovového prášku z karbidu wolframu

Karbid wolframu je jedním z nejtvrdějších a velmi otěruvzdorných materiálů používaných ke zvyšování odolnosti proti opotřebení a v nástrojové technologii. Používá se jako přísada do kovových prášků pro navařování povrchů vystavených extrémnímu mechanickému zatížení, posílení tvrdosti diamantových nástrojů nebo použitím práškových metalurgických procesů je možné vyrábět součásti téměř libovolného tvaru.

TAB. 10 Vlastnosti prášku z karbidu wolframu [15]

Tvrdost HV0.1	Hustota [g/cm ³]
2360	16 -17

❖ Příprava vzorků

Po laserovém navaření kovových prášků na substrát byl povrch vzorků hrbolatý a nerovnoměrný. Proto, aby mohlo proběhnout impaktní testování, musel být drsný povrch vzorku zbroušen a vyleštěn na hodnotu Ra = 0,4 μm.

Jakmile skončilo impaktní testování, začala na vzorcích příprava metalografického výbrusu. To zahrnuje rozříznutí daných vzorků, zalévání do pryskyřice z důvodu bezpečné manipulovatelnosti při další přípravě a zachování povrchových vrstev. Dále následovalo broušení, leštění a naleptání daných vzorků 3 % roztokem nitalu k vyvolání jejich mikrostruktury.

5.2 Přístroje použité při experimentu [2], [11], [14], [20], [34]

K testování vzorků, pořízení výsledků z impaktního testování a mechanických zkoušek bylo při experimentu použito několik přístrojů. Dále byly pořízeny snímky kráterů po impaktním testu a snímky mikrostruktury všech tří vzorků.

❖ Dynamický měřič otěru

Dynamický měřič otěru byl sestaven na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně. V experimentu byl použit pro zjištění příčin opotřebení povlakovaných částí nástrojů, strojů a kontaktů, které jsou značně dynamicky namáhány. Přístroj pracuje na principu dopadu tvrdé kuličky na rovinný vzorek. Podrobný princip zkoušení vzorků a vyhodnocení výsledků byl popsán v kapitole 4.4 Metoda dynamického rázového impaktoru.

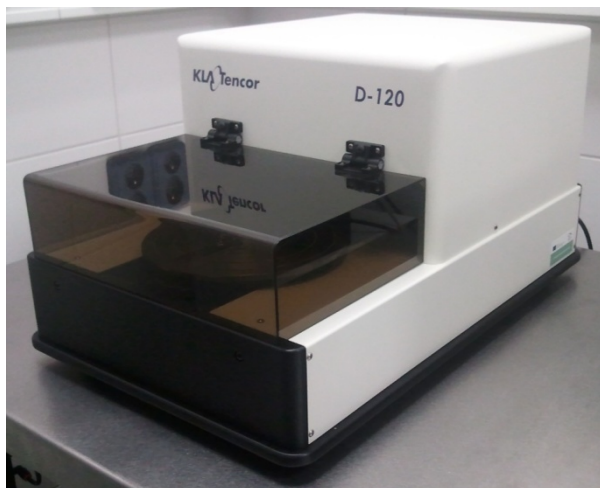


Obr. 38 Dynamický měřič otěru [11]

❖ Profilometr Alpha-Step D-120 Stylus

Jde o zařízení pro kontaktní měření profilů, kde je měřicí sondou diamantový hrot kuželového tvaru a poloměru křivosti (například 0,0125 mm), který se pohybuje po povrchu vzorku. Poloha hrotu je snímána snímačem (induktivním nebo kapacitním) a hrot je přitlačován na povrch vzorku nastavitelnou silou 0,03 mg – 10 mg.

Na tomto profilometru byly proměřeny velikosti parametrů jednotlivých kráterů po impaktním testu. Obslužným programem byla vyhodnocena střední hloubka kráteru a jeho průměr. Z těchto naměřených hodnot lze získat hodnotu objemu, která lépe charakterizuje velikost kráteru. Musíme však předpokládat, že je kráter dokonale symetrický a má rotační tvar.



a)



b)

Obr. 39 Profilometr Alpha-Step D-120 Stylus a) celý přístroj, b) snímek měřícího hrotu

❖ Konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS 3100

Konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS 3100 je představitelem nových optických systému s vysokou přesností 3D měření a zobrazování. Je vhodný pro bezkontaktní měření a kontrolu materiálů, miniaturních součástek a na kontrolu drsnosti povrchů se submikronovou přesností. Umožňuje zobrazení povrchů materiálů a součástí od přehledového zobrazení až po submikronové (rozsah zvětšení 120x až 14 400x). Vzorky se umísťují přímo na mikroskopický stolek a pozorování vzorků probíhá v reálném čase. Ovládací software poskytuje jednoduché a příjemné rozhraní s pokročilou analýzou obrazu. Na tomto mikroskopu byly pořízeny snímky kráterů po impaktním testování a snímky mikrostruktury na rozhraní navařené vrstvy a substrátu.



Obr. 40 Konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS 3100 [34]

❖ Tvrdoměr Zwick 3212

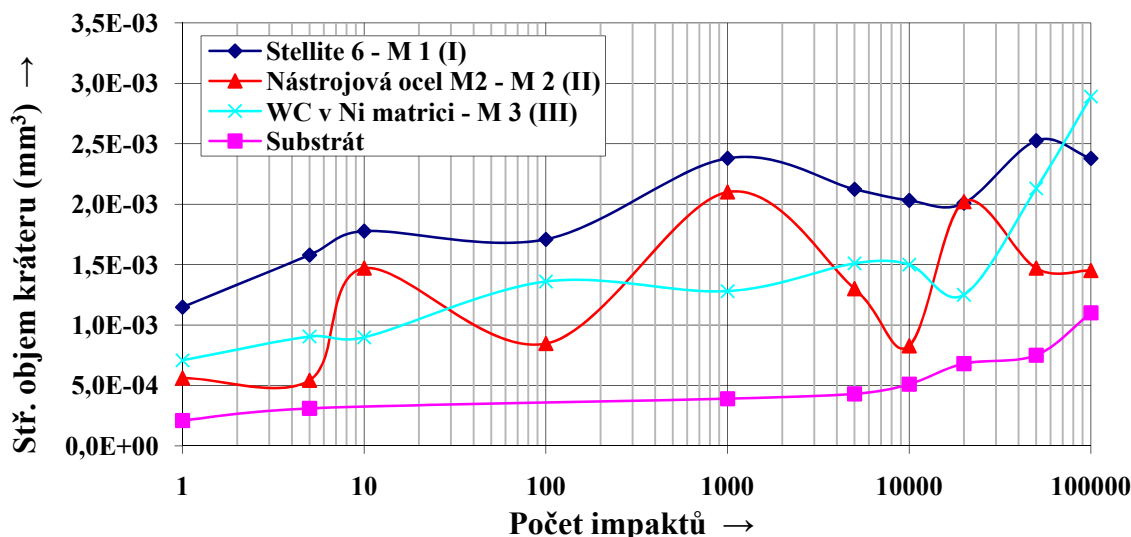
Tvrdoměr Zwick 3212 slouží pro stanovení tvrdosti podle Vickerse nebo Brinella v závislosti na měřeném materiálu. Přístroj je také vybaven zařízením pro měření mikrotvrdosti. Vyhodnocení vtisků proběhlo na připojeném počítači pomocí softwaru TestXpert od firmy Zwick. Při měření bylo zvoleno zatížení 10 kg a doba trvání zatížení 20 s.



Obr. 41 Tvrdoměr Zwick 3212

5.3 Zkouška dynamického rázového impaktoru

Impaktní testování vzorků proběhlo na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně pod vedením pana Ing. Jana Grossmana, CSc. Všechny vzorky byly testovány při konstantní impaktní síle 600 N, což představuje ekvivalentní napětí $\sim 2,1$ GPa. Jako indontoru bylo použito WC – kuličky, průměr kuličky byl 5 mm se speciálně vyhlazeným povrchem. Frekvence impaktů byla 8 Hz a zdvih 2,4 mm. Impakty byly prováděny v prostředí s relativní vlhkostí ~ 30 % při pokojové teplotě.

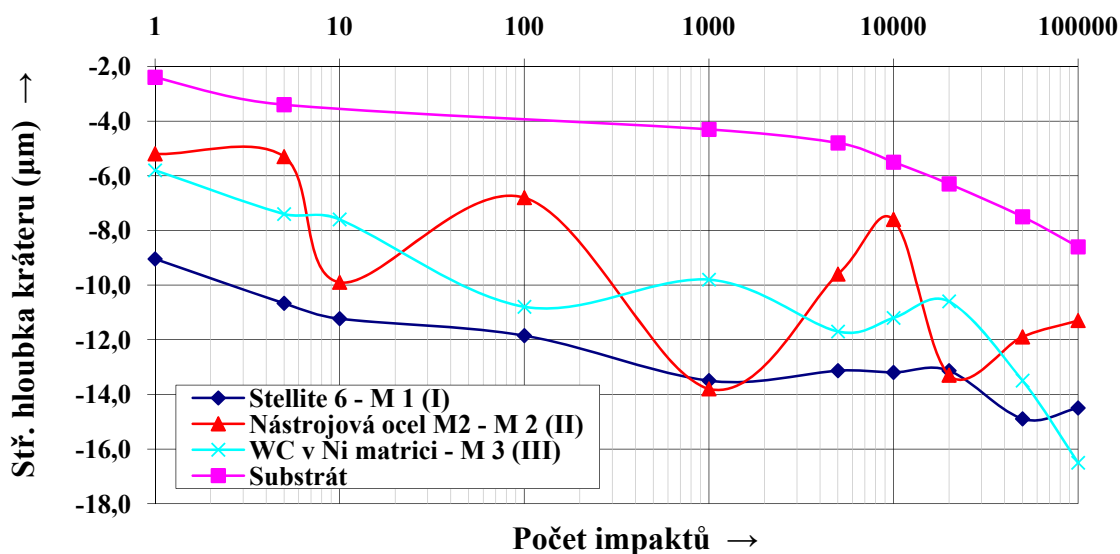


Obr. 42 Průběh závislosti změny středního objemu kráteru na počtu impaktů.

Obr. 42 ukazuje závislost středního objemu kráterů na počtu provedených impaktů, jak pro zvolené povlaky, tak i pro použitý substrát. Z obrázku je vidět, že

1. všechny tři povlaky jsou měkčí než použitý substrát (vyšší hodnoty objemu),
2. povlak z nástrojové oceli M2 je značně nehomogenní a porézní,
3. odpor proti opotřebení je nižší než u substrátu (viz tab. 11),
4. povlak z WC v Ni matrici vykazuje po $2 \cdot 10^4$ impaktů transport materiálů, to je uvolnění vrstev povlaku.

Na obr. 43 je vidět shodné chování povlaků, kdy charakteristickou veličinou byla střední hloubka kráterů. Nárůst hloubky kráterů u povlaku z NiCrBSi + WC po $2 \cdot 10^4$ impaktů je v souladu s bodem 4 u obrázku 42. Jak můžeme vidět na obr. 43, průměr kráterů hodnocení opotřebení tolik neovlivňuje.



Obr. 43 Průběh závislosti změny střední hloubky kráteru na počtu impaktů.

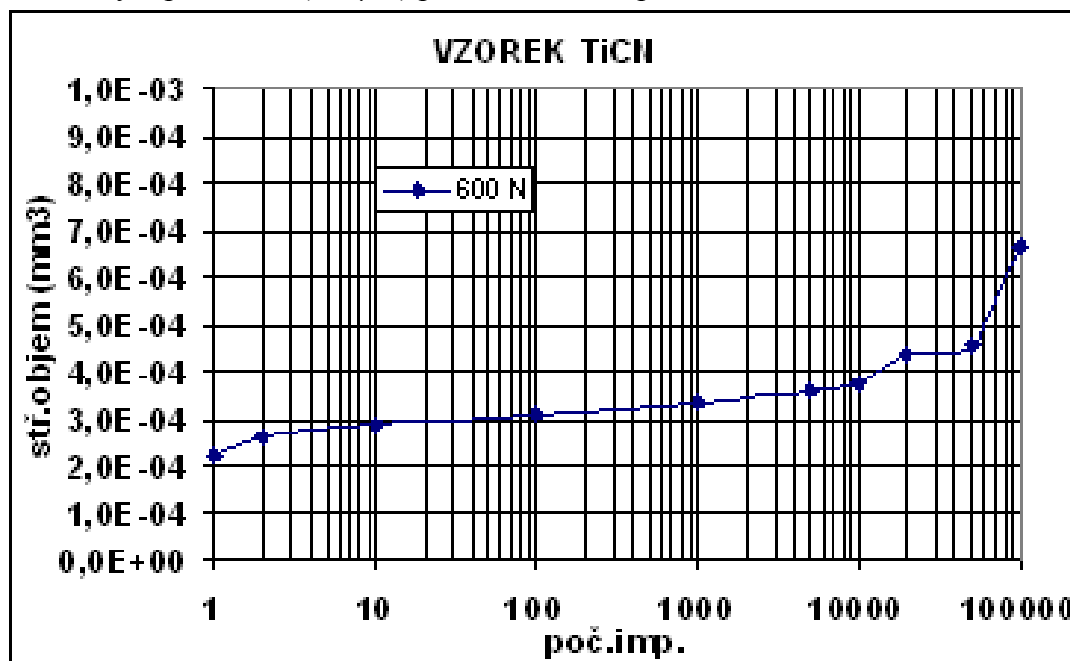
V tab. 11 jsou vypočítané hodnoty odporu proti opotřebení jako kvantitativní srovnání kvality povlaků a substrátu. Odpor je vyjádřen počtem impaktů v jednotkovém objemu kráteru a to se dvěma rozsahy impaktování, což vylučuje zahrnutí stavu uvolňování materiálů povlaku do vyhodnocení. V tab. 11 je dále uveden střední relativní rozptyl naměřených hodnot.

TAB. 11 Hodnoty odporu proti opotřebení

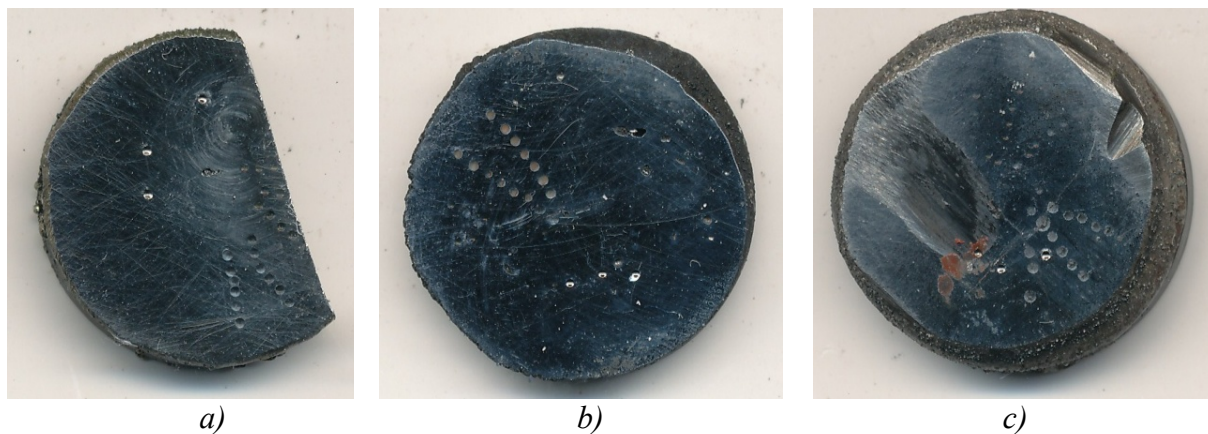
$1 - 10^5$		$1 - 10^4$	$\Delta V_{stř.}$
			%
1,12E+04 0,77	M 1 (I)	1,05E+04 0,72	4,2
1,81E+04 0,68	SUB:	3,80E+04 0,92	
1,32E+04 0,32	M 2 (II)	1,50E+04 0,18	15,1
7,87E+03 0,66	M 3 (III)	1,16E+04 0,91	17,5

Z uvedených výsledků impaktního testu je vidět skutečnost, že jde o první testy „tlustých“ vrstev se všemi odpovídajícími neduhy. Pozornost je proto třeba věnovat správné přípravě vzorků, zvláště pak rovinnosti povlaku se substrátem, mechanické úpravě bočních rovin a porézности povlaku. Z hlediska životnosti vrstvy v testu nejlépe obstála vrstva Stellitu 6, která má dle tabulky 11 vysoké hodnoty odporu proti opotřebení i za vyššího počtu impaktů a zároveň vykazuje poměrně malý rozptyl měřených hodnot.

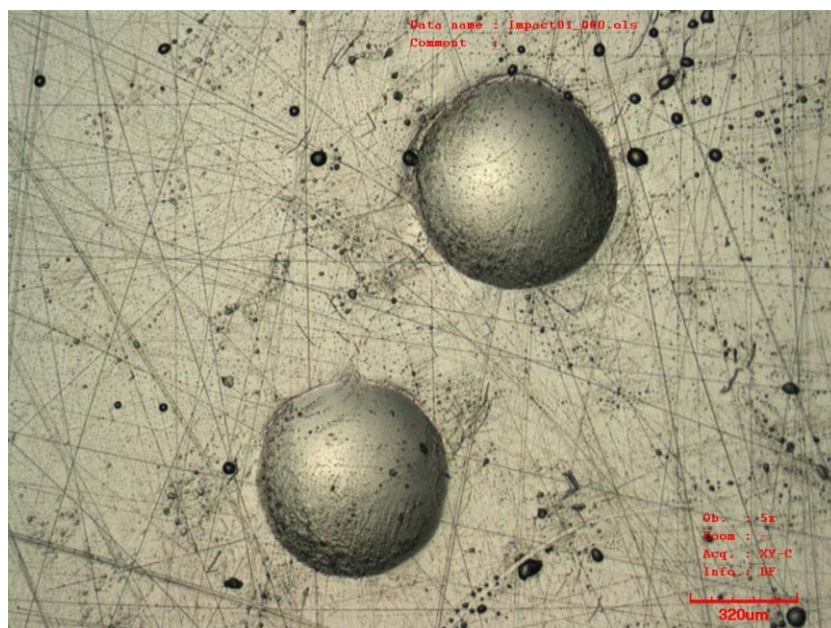
Pro porovnání výsledků z impaktního testu navařovaných vrstev a klasických povlaků uvádím průběh závislosti změny středního objemu kráteru na počtu impaktů pro vzorek s tenkovrstvým povlakem ($3,5 \mu\text{m}$) při konstantní impaktní síle 600 N.



Obr. 44 Závislosti stř. objemu kráteru na počtu impaktů pro vzorek s povlakem TiCN



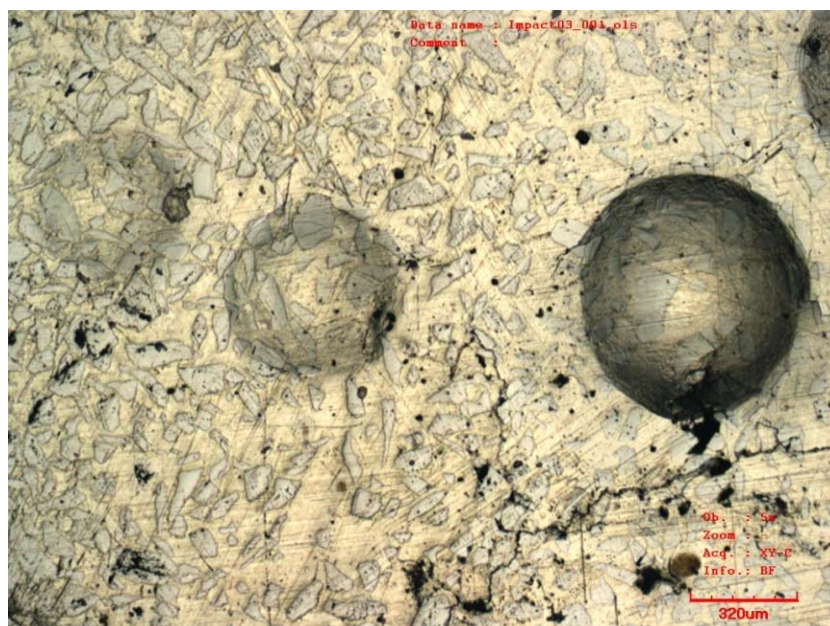
Obr. 45 Snímky vzorků po impaktním testování a) Stellite 6, b) nástrojová ocel M2, c) WC v Ni matrici



Obr. 46 Snímek kráterů na vrstvě Stellite 6 po impaktním testování



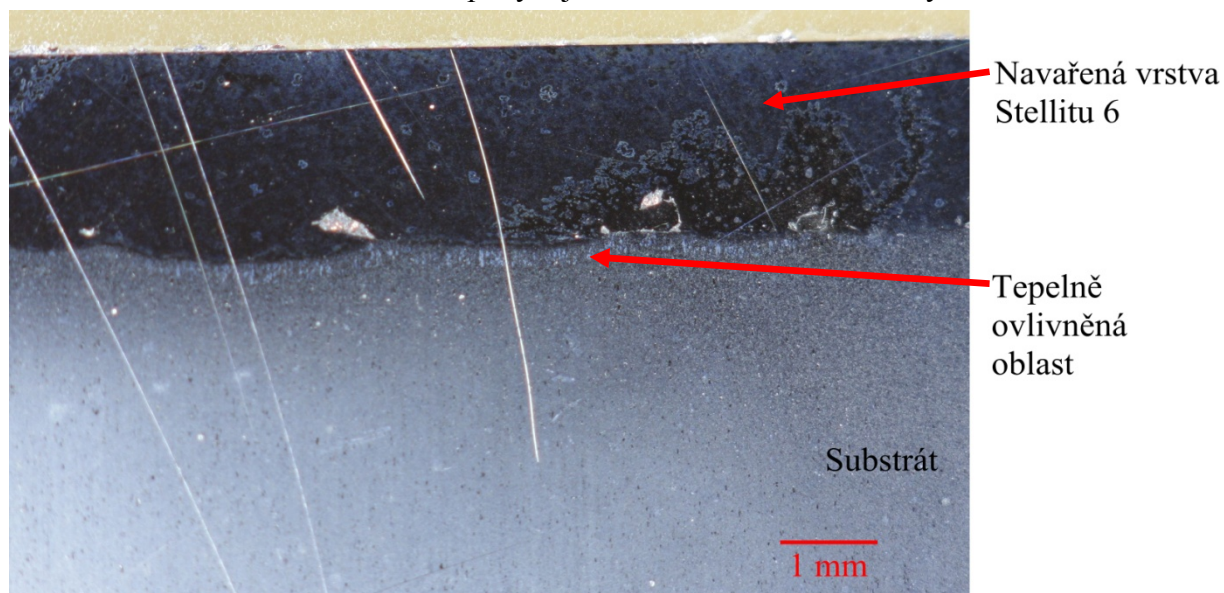
Obr. 47 Snímek kráterů na vrstvě nástrojové oceli M2 po impaktním testování



Obr. 48 Snímek kráterů na vrstvě WC v Ni matrici po impaktním testování

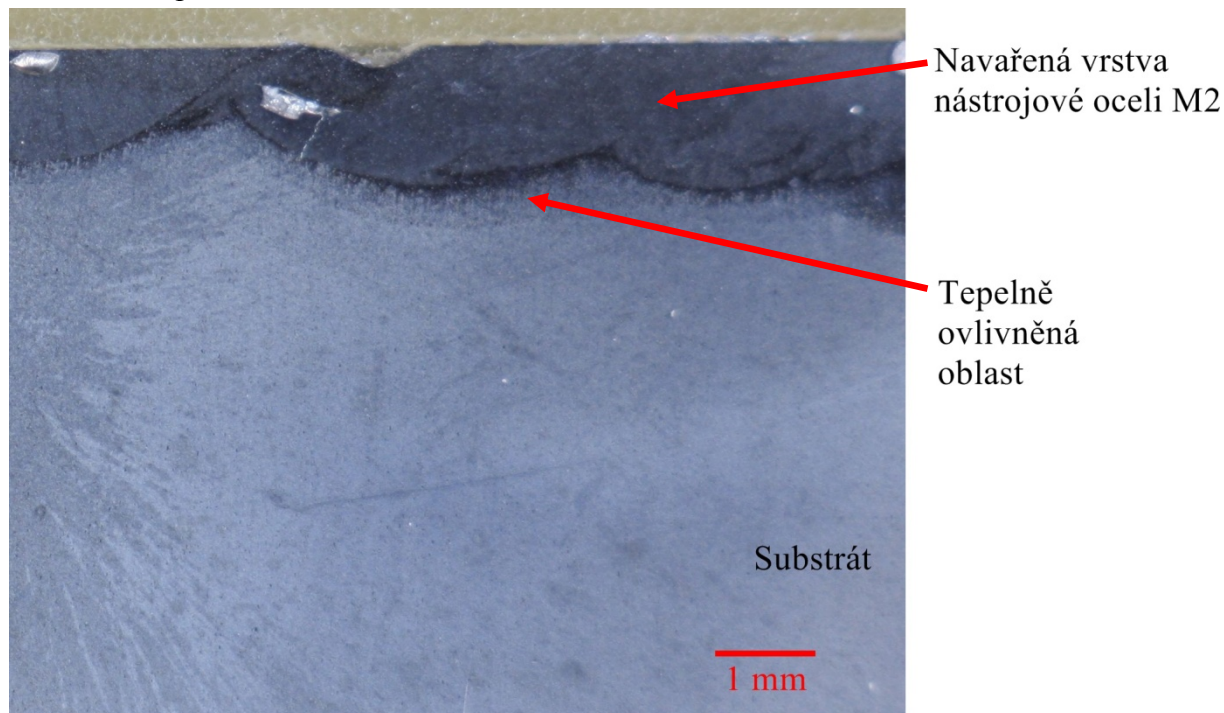
5.4 Vyhodnocení makrostruktury

Na obr. 49 je zobrazena makrostruktura navařené vrstvy Stellite 6 na substrátu. Ze snímku je vidět, že tato navařená vrstva je poměrně rovnoměrná, 2 mm silná, bez větších vad a pórů. Zředění základního materiálu s přídatným materiálem je velmi malé a tepelně ovlivněná oblast mezi vrstvou a substrátem se pohybuje v rozmezí setin až desetin milimetru.



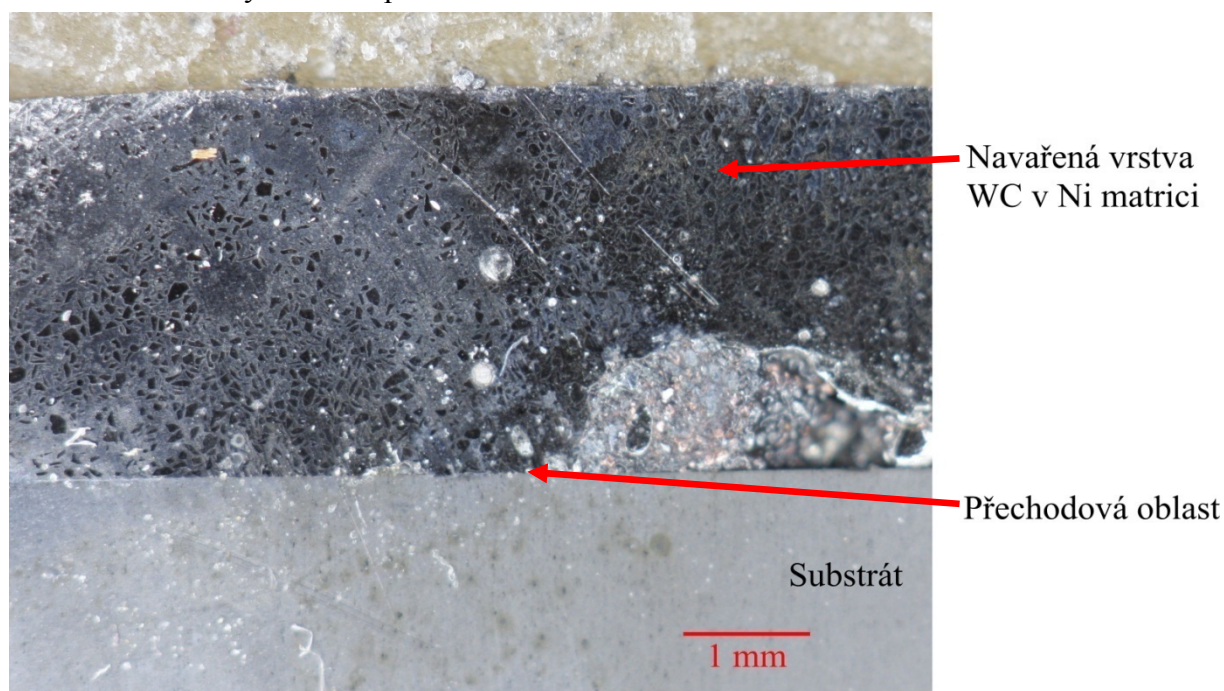
Obr. 49 Makrostruktura vrstvy Stellite 6

Obr. 50 ukazuje makrostrukturu navařené vrstvy z nástrojové oceli M2 a substrátu. Navařená vrstva je v tomto případě značně nerovnoměrná, silná maximálně 1 – 2 mm. Tepelně ovlivněná oblast je zde o něco větší než u vrstvy se Stellite 6, taktéž i zředění základního a přídatného materiálu.



Obr. 50 Makrostruktura vrstvy z nástrojové oceli M2

Na obr. 51 je makrostruktura vrstvy z NiCrBSi + WC a substrátu. Ze snímku jsou dobře rozeznatelná zrna WC v Ni matrici navařené vrstvy. Vrstva je rovnoměrná, tlustá 3 mm a bez větších vad. Viditelné zředění či tepelně ovlivněná oblast v přechodové zóně mezi vrstvou a substrátem není u tohoto vzorku prakticky žádné a nedá se tak pozorovat. To je žádoucí u všech navařovaných vrstev pomocí laseru.

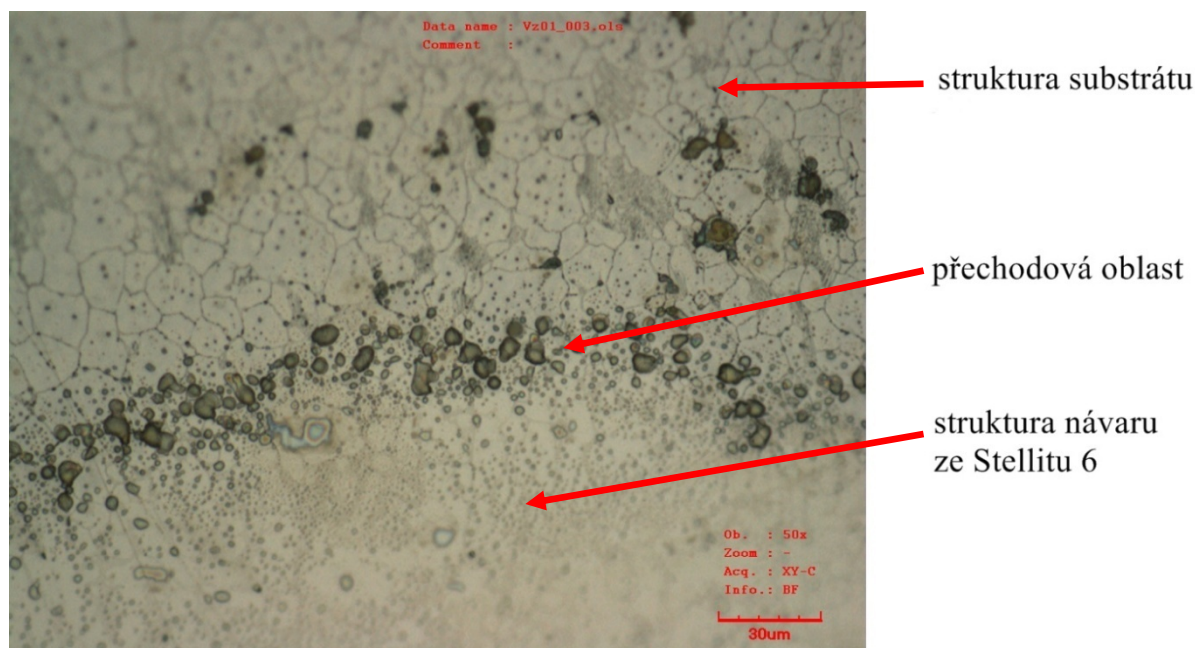


Obr. 51 Makrostruktura vrstvy z WC v Ni matrici

5.5 Vyhodnocení mikrostruktury

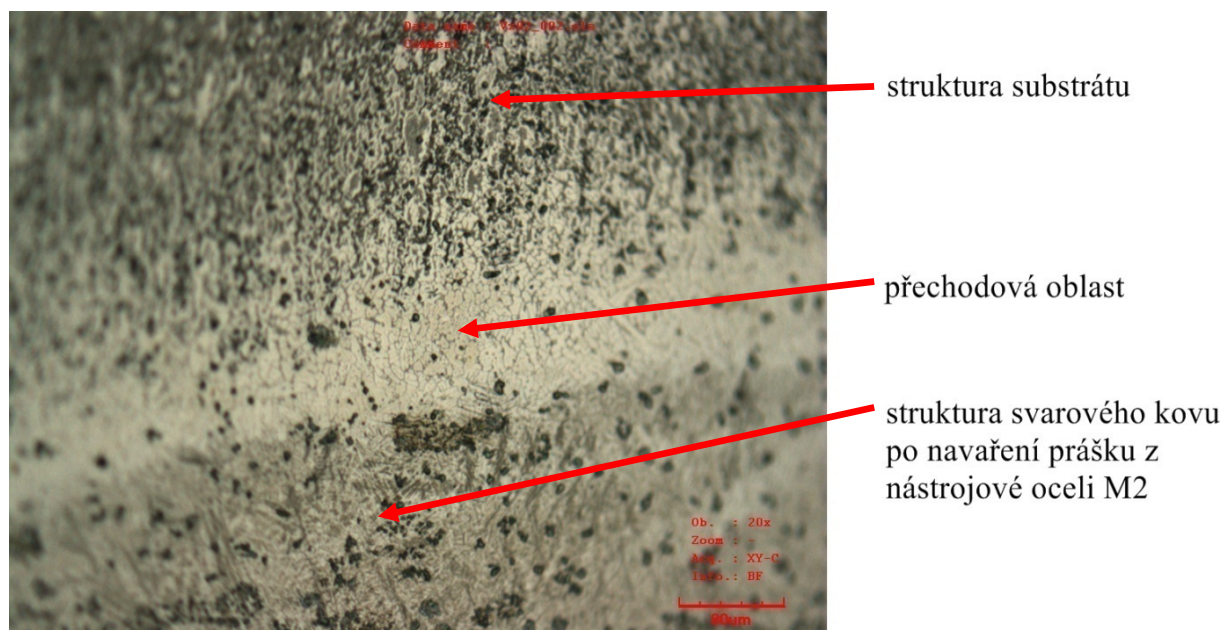
Snímky pro vyhodnocení mikrostruktury byly pořízeny na konfokálním mikroskopu Olympus LEXT OLS 3100 na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně.

Na obr. 52 lze pozorovat v přechodové oblasti mezi vrstvou Stellite 6 a substrátem pás nečistot, které se zřejmě nacházely na povrchu základního materiálu ještě před navařením prášku. Dále můžeme vidět malé zhrubnutí zrna základního materiálu v tepelně ovlivněné oblasti.



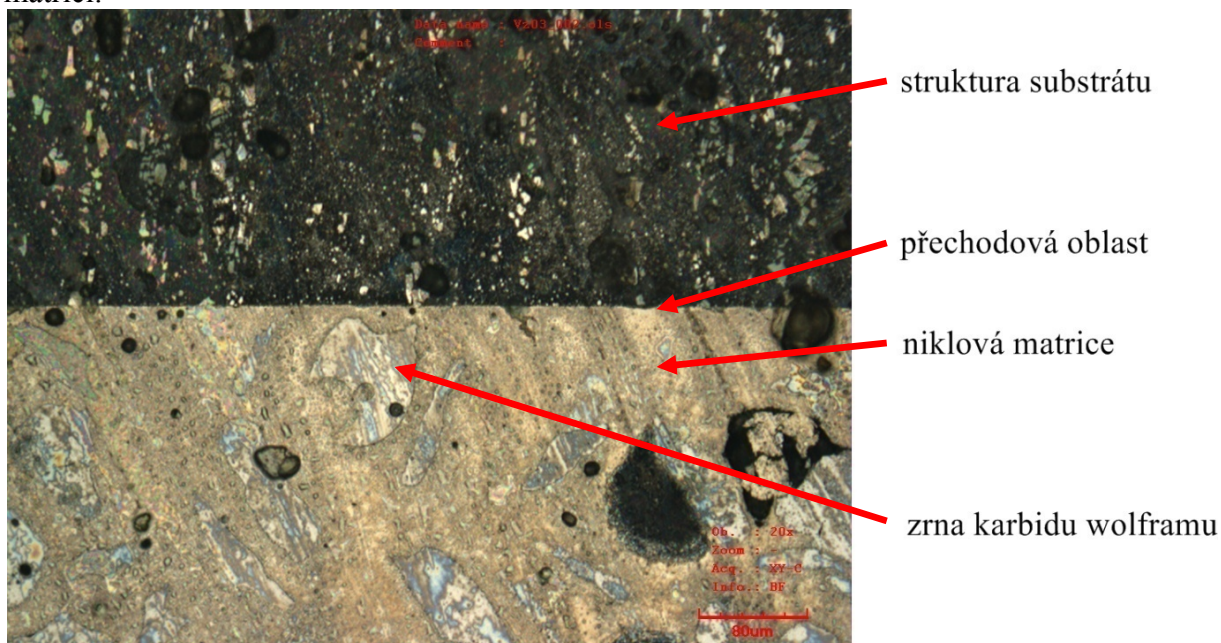
Obr. 52 Mikrostruktura přechodové oblasti mezi vrstvou Stellite 6 a substrátem

Obr. 53 ukazuje mikrostrukturu mezi vrstvou nástrojové oceli M2 a substrátem. Ze snímku je vidět, že navařená vrstva je ze stejného materiálu jako substrát. V přechodové oblasti došlo k přehřátí materiálu a k následnému zhrubnutí zrna. V navařené vrstvě můžeme pozorovat směr růstu dendritů.



Obr. 53 Mikrostruktura přechodové oblasti mezi vrstvou nástrojové oceli M2 a substrátem

Na obr. 54 je zobrazena mikrostruktura vrstvy NiCrBSi + WC a substrátu. Substrát se zde jeví jako by šlo o jiný materiál, ale to je způsobeno pouze změnou osvětlení při pořizování snímku, jinak by nevynikla struktura navařené vrstvy. Rozhraní mezi substrátem a vrstvou je ostré a s minimálním zředěním. Ve struktuře navařené vrstvy jdou krásně vidět zrna WC v Ni matrici.



Obr. 54 Mikrostruktura vrstvy NiCrBSi + WC a substrátem

5.6 Měření tvrdosti a mikrotvrdosti

Tvrdost byla měřena na Rockwellově tvrdoměru diamantovým kuželem a zatížením bylo 150kg. Na povrchu každého vzorku byla provedena tři měření a z těchto hodnot se vypočítala průměrná hodnota tvrdosti daného vzorku, jak ukazuje tab. 12. Výsledná průměrná hodnota tvrdosti návaru z nástrojové oceli M2 a WC v Ni matrici byla o něco nižší, než je uvedeno v charakteristice jednotlivých materiálů. Rozdíl však není veliký a tato nepřesnost může být přisouzena odchylce a nepřesnosti při měření.

TAB. 12 Tabulka naměřených hodnot tvrdosti vzorků

Druh návaru	Číslo měření	Naměřená hodnota HRC	Průměrná hodnota HRC
Stellit 6	1	43	45
	2	45	
	3	47	
nástrojová ocel M2	1	55	53
	2	54	
	3	50	
WC v Ni matrici	1	56	55
	2	52	
	3	57	

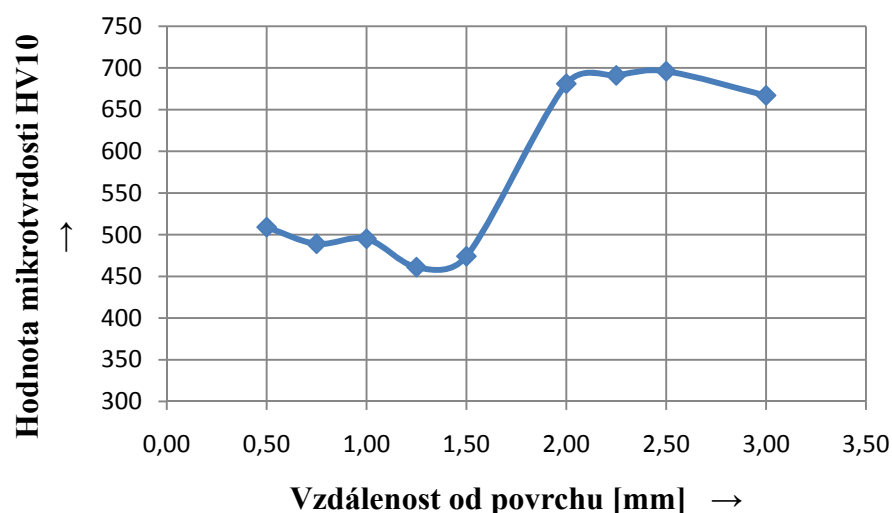
Mikrotvrdost byla měřena na tvrdoměru Zwick 3212 a vyhodnocena programem TestXpert. Zatížení během měření bylo 10 kg, doba trvání zatížení 20 s a vzdálenost mezi jednotlivými vpichy 0,5 mm ve dvou řadách. Měření probíhalo od povrchu vrstvy směrem do substrátu, a protože má substrát větší tvrdost než dané vrstvy, měla by mikrotvrdost stoupat. Tolerance odchylky naměřených hodnot je ± 10 HV10.

❖ Vzorek č.1 – Stellite 6

Naměřené hodnoty mikrotvrdosti ukazuje tab. 13 a samotný průběh mikrotvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu obr. 55. Z naměřených hodnot je zřejmé, že vrstva Stellite 6 je měkčí než daný substrát a průběh mikrotvrdosti tak splňuje vzrůstající předpoklad.

TAB. 13 Tabulka naměřených hodnot mikrotvrdosti Stellite 6 a substrátu

Vzdálenost od povrchu [mm]	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	2,00	2,25	2,50	3,00
Naměřená mikrotvrdost HV10	509	489	495	461	474	681	691	696	667



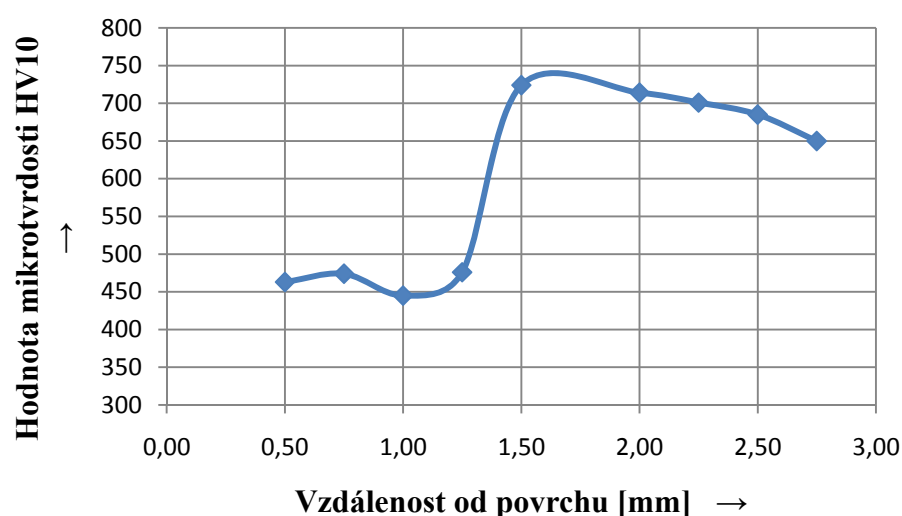
Obr. 55 Závislost průběhu mikrotvrdosti na vzdálenosti od povrchu vzorku č. 1

❖ Vzorek č. 2 – nástrojová ocel M2

Naměřené hodnoty mikrotvrdosti ukazuje tab. 14 a samotný průběh mikrotvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu obr. 56. Hodnoty mikrotvrdosti vrstvy jsou v tomto případě také nižší než mikrotvrdost substrátu, ale zároveň jsou i nižší než hodnoty u vrstvy Stellite 6, což by dle materiálových listů mělo být obráceně.

TAB. 14 Tabulka naměřených hodnot mikrotvrdosti nástrojové oceli M2 a substrátu

Vzdálenost od povrchu [mm]	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	2,00	2,25	2,50	2,75
Naměřená mikrotvrdost HV10	463	474	445	476	724	714	701	685	650



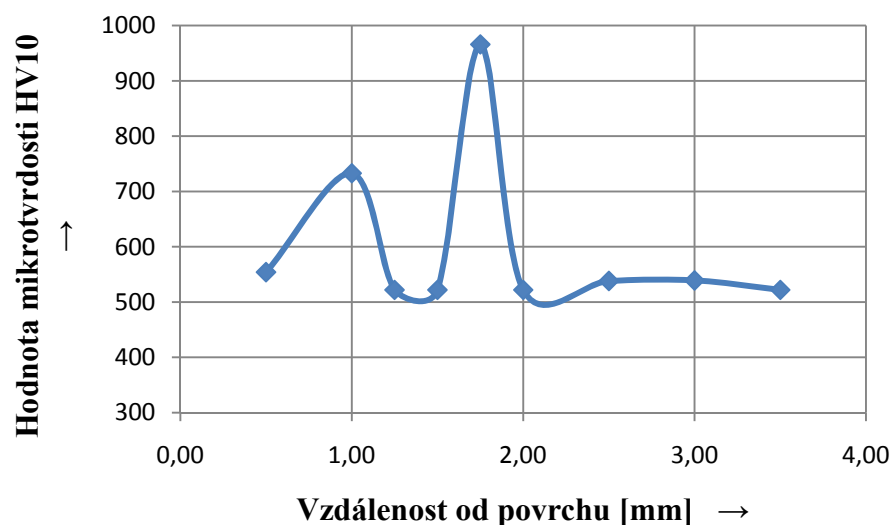
Obr. 56 Závislost průběhu mikrotvrdosti na vzdálenosti od povrchu vzorku č. 2

❖ Vzorek č. 3 – WC v Ni matrici

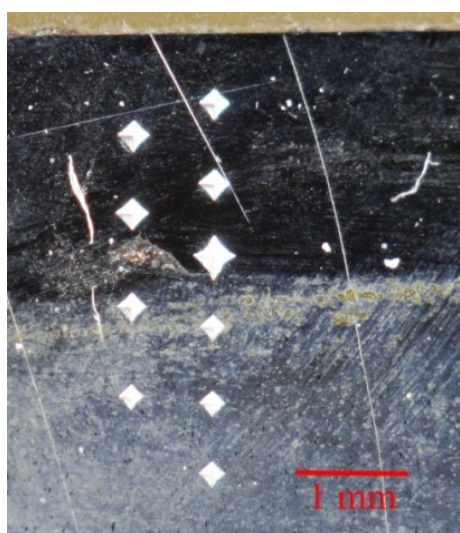
Naměřené hodnoty mikrotvrdomosti ukazuje tab. 15 a samotný průběh mikrotvrdomosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu obr. 57. Naměřené hodnoty vrstvy WC v Ni matrici vykazují velký rozptyl. To bude způsobeno tím, že jsme při měření umístili vpich přímo na zrno WC, které má vysokou tvrdost a to se promítlo do naměřené hodnoty mikrotvrdomosti. Substrát u tohoto vzorku vykazuje oproti ostatním vzorkům výrazně nižší hodnoty mikrotvrdomosti. Příčinou tohoto poklesu mikrotvrdomosti bude zřejmě velmi silná vrstva WC v Ni matrici, která během procesu navařování přehřála základní materiál, ve kterém zhrublo zrno a klesla tak tvrdost substrátu.

TAB. 15 Tabulka naměřených hodnot mikrotvrdomosti vrstvy WC v Ni matrici a substrátu

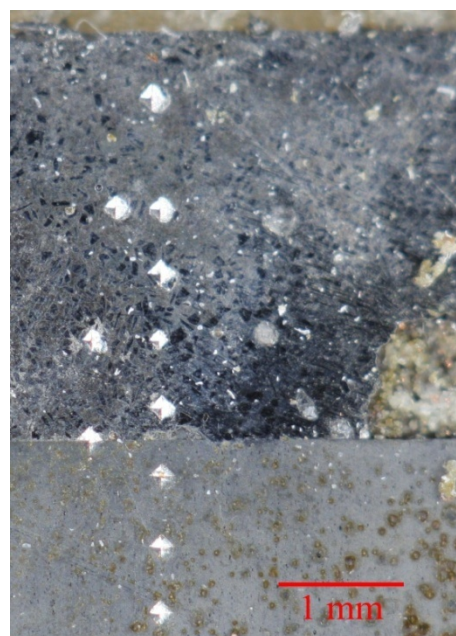
Vzdálenost od povrchu [mm]	0,50	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,50	3,00	3,50
Naměřená mikrotvrdomost HV10	554	733	522	522	966	522	538	539	522



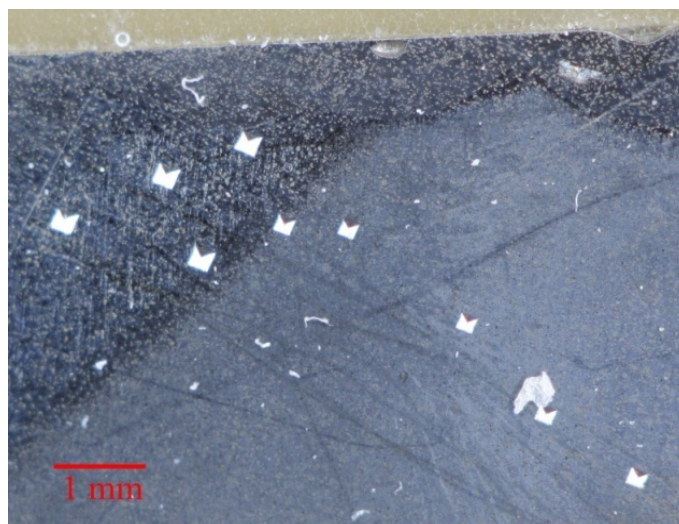
Obr. 57 Závislost průběhu mikrotvrdomosti na vzdálenosti od povrchu vzorku č. 3



Obr. 58 Měření mikrotvrdomosti u vrstvy Stellite 6



Obr. 59 Měření mikrotvrdomosti u vrstvy WC v Ni matrici



Obr. 60 Měření mikrotvrdosti vrstvy z nástrojové oceli M2

5.7 Technicko ekonomické zhodnocení

Ekonomické hodnocení se v této práci omezí pouze na cenu materiálu, provozní a výrobní náklady zanedbáme. Porovnájí se náklady na povlak vytvořený laserovým navařováním proti povlaku vytvořeným žárovým nástřikem plasmou.

Ceny povlaků zde uvedené jsou pouze orientační, protože se mohou vlivem různých faktorů měnit. V případě ceny žárového nástřiku plasmou se jedná o hodnoty zveřejněné na internetu a informace o nákladech na vrstvu vytvořenou laserovým navařováním poskytla firma MATEX PM, s.r.o. Náklady závisí především na druhu použitého přídavného materiálu a jeho ceně. Cena za 1 kg přídavného prášku se u laserového navařování pohybuje v rozmezí 500 až 2000 Kč a tvoří minimálně polovinu celkové ceny výroby návaru. Dále potom záleží i na tloušťce vrstvy, kterou chceme vytvořit.

TAB. 16 Srovnání nákladů na vytvoření povlaku pomocí různých metod

metoda	materiál vrstvy	tloušťka vrstvy [mm]	cena [Kč/cm ²]
žárové stříkání plasmou	Cr ₂ O ₃	0,2 - 0,3	1,5 - 2
laserové navařování	nerez	2	12

To je ovšem jen zjednodušený příklad. Pro laserové aplikace je nutné používat speciální přípravky (stůl, upínací přípravky, přidržovače, popřípadě polohovadla), které nejsou v ceně zahrnuty. U žárového stříkání plasmou musí být povrch před samotným nanášením vrstvy ještě ošetřen, což také navýší cenu. I když je laserové navařování drahá metoda úpravy povrchu součásti, je ze všech nejkvalitnější, a proto nachází v praxi velké využití.

6 ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo studium vrstev vytvořených laserovým navařováním a testování otěruvzdornosti těchto vrstev pomocí metody dynamického rázového impaktoru. Materiály pro vytvoření vrstev byly vybrány Stellite 6, nástrojová ocel M2 a WC v Ni matrici. Tyto kovové prášky se po navaření vyznačují dobrou otěruvzdorností a vysokou tvrdostí. Jako základní materiál, na kterém byly návary vytvořeny, byla zvolena tepelně zpracovaná nástrojová rychlořezná ocel ČSN 19 830. Navařovací parametry a základní materiál byly pro všechny vzorky stejné, z důvodu porovnatelnosti získaných výsledků po testování.

Lze říci, že výsledky provedených testů na dynamickém měřiči otěru naplňují očekávání. Z dosažených výsledků experimentu je zřejmé, že šlo o první testy silnějších vrstev se všemi odpovídajícími vadami, které se mohou během přípravy navařovaných vrstev vyskytnout. U vrstvy na bázi kobaltu Stellite 6 bylo dosaženo velmi dobrých výsledků kvality povlaku, ať už jde o homogenitu vrstvy, tvrdost, nízké procento pórovitosti, atd. Také špatné výsledky při impaktním testování vrstvy z nástrojové oceli M2 ukazují na fakt, že je potřeba věnovat pozornost správné přípravě vzorků. Hlavní pozornost bych pak věnoval především samotnému průběhu navařovacího procesu, aby nedocházelo k přehřátí základního materiálu, a tím ke zhrubnutí zrna jako tomu bylo u vrstvy WC v Ni matrici. Pro použití laserových návarů u součástí značně namáhaných na otěr, jako jsou například hrany lopat bagrů a rypadel, bych doporučil prášky na bázi kobaltu. Ty se prokázaly během testování dobrými výsledky a vykazovaly dlouhou životnost povlaku.

Povrchová úprava metodou laserového navařování výrazně prodlužuje životnost a zlepšuje funkční vlastnosti nových součástí. Také možnost opravy a repase strojních součástí pomocí této metody má příznivý vliv z hlediska snižování výrobních nákladů na výměnu součástí.

Seznam použité literatury [5]

- [1] Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: a unified approach. *ScienceDirect.com | Search through over 11 million science, health, medical journal full text articles and books*. [online]. 1998 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X98000048>
- [2] AlphaStep® D-120 Stylus Profiler. *Process Control and Yield Management Solutions | KLA- Tencor* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://www.kla-tencor.com/surface-profiling/alpha-step-d-120.html>
- [3] BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELEK. *Lasérové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
- [4] BUREŠ, Jiří. Fyzikální jednotky - podrobný popis. *ConVERTER - převody jednotek* [online]. 2002 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/index.htm>
- [5] CITACE PRO. *Citace PRO VUT v Brně* [online]. 2012 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz>
- [6] Co je laserová technologie?. *Průmyslové značení výrobků a dílu, automatizace & Lintech* [online]. © 2009-2011 [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/co-je-laserova-technologie>
- [7] Časový přehled. *Aktuálně | Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. © 2005 – 2013 [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/casovy-prehled>
- [8] DOLEŽAL, Pavel a Bohumil PACAL. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů*. [2003].
- [9] DRIML, Bohuslav. ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ. *Chemikalie.upol.cz* [online]. [2012] [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf
- [10] File:BrinellSkizze.jpg. *Main Page – Wikimedia Commons* [online]. [2009] [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:BrinellSkizze.jpg?uselang=cs>
- [11] FOŘT, Tomáš. *Charakterizace nanostruktur deponovaných PVD a CVD technologiemi*. Brno, 2009. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky.
- [12] FÜRBAACHER, Ivan, Karel MACEK a Josef STEIDL. *Lexikon technických materiálů: Svazek 3*. Praha: Dashöfer, 2001. ISBN 80-86229-02-5.
- [13] GEDDA, Hans. *Laser surface cladding a literature survey*. 22.3.2000, 38 s.
- [14] GROSSMAN, Jan. *Využití dynamického měřiče otěru*. [2008].
- [15] Hardfacing Materials. *Durum Homepage* [online]. 2007 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://www.durmat.com/PDF-Files/Datenblaetter_en/Durum_Gesamtkatalog.pdf
- [16] HÁJEK, Jiří a Antonín KŘÍŽ. TRIBOLOGICKÁ ANALÝZA „PIN-on-DISC“. *METAL 2013* [online]. 26.5.2005 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_05/papers/70.pdf
- [17] Historie laseru. *LaserArt* [online]. 2010 [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.laserart.wbs.cz/Historie-laseru.html>

- [18] HISTORIE VÝVOJE LASERU. *Leonardo technology* [online]. 2005 - 2013 [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: http://www.lt.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=224&Itemid=24
- [19] CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. Olomouc, 2010.
- [20] Konfokální mikroskop. *Základní údaje, Úvod, Ústav fyziky FAST VUT* [online]. © 2001-2013 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/konfokalni_mikroskopie.pdf
- [21] KUSALA, Jaroslav. Cesta k objevu. *LASER A JEHO VYUŽITÍ* [online]. 2004 [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k12.htm>
- [22] KUSALA, Jaroslav. O světle. *LASER A JEHO VYUŽITÍ* [online]. 2004 [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/f2.htm>
- [23] KUSALA, Jaroslav. Typy laserů. *LASER A JEHO VYUŽITÍ* [online]. 2004 [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
- [24] LAPŠANSKÁ, Hana. Průmyslové aplikace laserů. *Portál moderní fyziky* [online]. Olomouc, [2010] [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/lapsanska_prumyslove_a_plikace_laseru.pdf
- [25] LAPŠANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. *Portál moderní fyziky* [online]. Olomouc, 13.12.2010 [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [26] Laser. *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. 2013 [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [27] Laserová technologie zajistí snadné označování miniaturních součástí. *PRŮMYSL.cz — informační portál pro český průmysl* [online]. 1. 3. 2013 [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: <http://www.prumysl.cz/laserova-technologie-pro-oznacovani-miniaturnich-soucasti/>
- [28] Laserové a plazmové řezání (84, 83). *INNET - HomeN - Home Server with Novell Open Enterprise Server 2* [online]. [2008] [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>
- [29] Laserové kalení. *Home - TRUMPF Česká Republika* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/obrabeni-povrchu/laserove-kaleni.html>
- [30] LASEROVÉ KALENÍ. *LAO - lasery a optika* [online]. [2013] [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/povrchove-upravy-93/laserove-kaleni-94>
- [31] Laserové navařování. *Lasery pro průmyslové technologie, laserové systémy - LaserTherm* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/nabizene-sluzby/laserove-navarovani/>
- [32] Laserové vrtání. *Průmyslové značení výrobků a dílu, automatizace & Lintech* [online]. © 2009-2011 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-vrtani>
- [33] LASEROVÉ ZNAČENÍ A GRAVÍROVÁNÍ. *LAO - lasery a optika* [online]. [2013] [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-znaceni-89>
- [34] Laserový konfokální řádkovací mikroskop. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 25.04.2007 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserovy-konfokalni-radkovaci-mikroskop.html>

- [35] Lasers for Confocal. *Microscopes and Microscopy Imaging Solutions: Leica Microsystems* [online]. 2011 [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: <http://www.leica-microsystems.com/science-lab/lasers-for-confocal/>
- [36] LUDVÍK, Jan, Karel BÍLEK a Štěpán LUDVÍK. ZKOUŠKY TVRDOSTI. *METROTEST s.r.o. - přístroje pro měření, kontrolu a testování* [online]. 22.11.2010 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrlosti.pdf
- [37] Microhardness Test. *Thermal Spray Coatings* [online]. [2013] [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.gordonengland.co.uk/hardness/microhardness.htm>
- [38] Microhardness Testing. *Metallurgy by Metallurgist Tom Bertone at Metallurgy.com* [online]. © 1996 - 2013 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.metallurgy.com/services/microhardness.cfm>
- [39] MIKROOBRÁBĚNÍ. *LAO - lasery a optika* [online]. [2013] [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/mikroobrabeni-95>
- [40] Mikroobrábění. *Home - TRUMPF Česká Republika* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/mikroobrabeni.html>
- [41] MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser* [prezentace]. [2012] [cit. 18.03.2013].
- [42] MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky* [prezentace]. 2011 [cit. 2013-03-12].
- [43] Numerical study of sliding wear caused by a loaded pin on a rotating disc. *ScienceDirect.com | Search through over 11 million science, health, medical journal full text articles and books.* [online]. 2002 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002250960100093X>
- [44] OŠŤÁDAL, Ivan. *Metody studia tenkých vrstev. Česká vakuová společnost* [online]. 2007 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: http://www.vakspol.cz/z/downloads/zpr07_1-2.pdf
- [45] Powders clad by MATEX PM. *MATEX PM, s.r.o.* [online]. © 2011 [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: <http://www.matexpm.com/images/downloads/vlastnosti.pdf>
- [46] Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 4.9.2012 [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
- [47] Průmyslové lasery (5) - Laserové řezání. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 17.10.2012 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html>
- [48] Řezání laserem a vrtání laserem. *Home - TRUMPF Česká Republika* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani.html>
- [49] SCHNEIDER, Marcel Fredrik. *LASER CLADDING*. Enschede: Print Partners Ipskamp, 1998. ISBN 90 365 1098 8.
- [50] Scratch Test. *Welcome to CSM Instruments | CSM Instruments* [online]. [2010] [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: <http://www.csm-instruments.com/en/Scratch>
- [51] Scratch tester. *PVD Coatings | Your guide to PVD coating technology, applications and theory.* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: <http://www.pvd-coatings.co.uk/pvd-coating-technology/testing-equipment/scratch-tester/>

- [52] SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ I (LASER WELDING). *LAO - lasery a optika* [online]. 15.7.2011 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
- [53] STELLITE® 6 ALLOY. *Deloro Stellite - Swindon, Wiltshire - United Kingdom > Home* [online]. © 2008 [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: <http://stellite.co.uk/Portals/0/Stellite%206%20Final.pdf>
- [54] Svařování laserovým paprskem a pájení laserem. *Home - TRUMPF Česká Republika* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svareni.html>
- [55] ŠEBESTOVÁ, Hana. Průmyslové lasery pro svařování. *Portál moderní fyziky* [online]. [2010] [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_prumyslove_lasery_pro_svarovani.pdf
- [56] ŠULC, Jan. Průmyslové aplikace laserových systémů. *PLS Laser systems s.r.o.* [online]. 13.7.2004 [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
- [57] Taber Abraser (Abrader). *Taber Industries - Home Page* [online]. 2011-2013 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.taberindustries.com/taber-rotary-abraser>
- [58] TOYSERKANI, Ehsan, Amir KHAJEPOUR a Stephen CORBIN. *Laser Cladding*. CRC Press LLC, © 2005. ISBN 0-8493-2172-7.
- [59] TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH + CO. KG. *Technical information: Laser processing*. 2007.
- [60] Tenké vrstvy. *Oddělení povrchového inženýrství - aktuálně* [online]. [2013] [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
- [61] Vrtání. *Home - TRUMPF Česká Republika* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/vrtani.html>
- [62] WASSERBAUER, Jaromír. Tvrdost (mikrotvrdost) – významná mechanická vlastnost materiálů. *ChemPoint* [online]. 14. 12. 2011 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/tvrdost-mikrotvrdost>
- [63] WEAR TESTING. *EndoLab GmbH - Implantatprüfungen - Implant testing* [online]. [2010] [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: http://www.endolab.org/downloads/endolab_material_wear.pdf
- [64] WEAR TESTING. *Expert Engineering Materials Consultancy & Testing Services* [online]. [2003] [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: http://www.materials.co.uk/wear_test.htm
- [65] Zkoušky tvrdosti. *Oddělení povrchového inženýrství - aktuálně* [online]. [2013] [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf
- [66] “Undiluted hardness”. *Laser-Community | The Trumpf Laser Magazin* [online]. 2011 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: http://www.laser-community.com/start/it-helps-me-sleep-better_1196/

Seznam použitých symbolů a zkratk

Označení	Legenda	Jednotka
a	Výška navařené vrstvy	[mm]
AISI	American Iron and Steel Institute = Americký ústav železa a oceli	
b	Hloubka substrátu, který byl roztaven v průběhu navařování	[mm]
CVD	Chemical Vapor Deposition	
ČSN	Česká technická norma	
D	Průměr kuličky	[mm]
d	Průměr vtisku	[mm]
d _m	Průměr paprsku na výstupu z rezonátoru	[mm]
E	Vektor intenzity elektrického pole	[-]
F	Zkušební zatížení	[N]
h	Hloubka vtisku indentoru	[mm]
L	Délka delší úhlopříčky	[mm]
PVD	Physical Vapor Deposition	
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
RF	Radiofrekvenční buzení laseru	
u	Aritmetický průměr dvou délek úhlopříček	[mm]
w	Šířka návaru	[mm]
θ	Rozbíhavost laserového paprsku	[-]
λ	Vlnová délka záření	[mm]
π	Ludolfovo číslo	[-]

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 Ukázka využití laserového navařování v praxi.....	11
Obr. 2 Model prvního laseru (vlevo) a prvního plynového laseru u nás (vpravo)	12
Obr. 3 Srovnání záření žárovky a laseru	13
Obr. 4 Elektromagnetické spektrum	13
Obr. 5 Ukázka elektromagnetických módů TEM	13
Obr. 6 Rozbíhavost laserového paprsku	14
Obr. 7 Lineární polarizace (vlevo) a kruhová polarizace (vpravo) paprsku laseru	14
Obr. 8 Základní prvky laseru	15
Obr. 9 Schéma SLAB laseru.....	17
Obr. 10 LPSS Nd:YAG laser.....	18
Obr. 11 Schéma diskového laseru.....	18
Obr. 12 Schéma vláknového laseru	19
Obr. 13 Vznik záření v optickém vlákně.....	19
Obr. 14 Schéma diodového laseru	19
Obr. 15 Přehled využití laseru v průmyslu	21
Obr. 16 Princip řezání laserem	21
Obr. 17 Fokuse svazku při tavném řezání	22
Obr. 18 Fokuse svazku při oxidačním řezání	22
Obr. 19 Ukázka některých metod vrtání laserem	23
Obr. 20 Metody svařování laserem.....	24
Obr. 21 Ukázka laserového značení	25
Obr. 22 Příklad laserového navařování.....	25
Obr. 23 Rozdíl v mikrostruktuře při laserovém legování, glazování a navařování	26
Obr. 24 Metody laserového navařování.....	27
Obr. 25 Průřez navařenou vrstvou s definicí geometrie	28
Obr. 26 Koaxiální (vlevo) a boční (vpravo) tryska.....	30
Obr. 27 Zkouška tvrdosti podle Brinella	32
Obr. 28 Zkouška tvrdosti podle Vickerse	33
Obr. 29 Zkouška tvrdosti podle Rockwella	33
Obr. 30 Zkouška tvrdosti podle Knoopu	34
Obr. 31 Ukázka měření mikrotvrdosti	35
Obr. 32 Schéma metody „Pin-on-disk“	36
Obr. 33 Princip metody „Abrasion wheel test“	37
Obr. 34 Schéma „Scratch testu“	38
Obr. 35 Mechanické uspořádání dynamického testeru	38
Obr. 36 Obecný tvar zátěžové křivky	39
Obr. 37 Příklad měření průměru kráteru na profilometru Talystep.....	39
Obr. 38 Dynamický měřič otěru	42
Obr. 39 Profilometr Alpha-Step D-120 Stylus a) celý přístroj, b) snímek měřícího hrotu	42
Obr. 40 Konfokální mikroskop Olympus LEXT 2	43
Obr. 41 Tvrdoměr Zwick 321	43
Obr. 42 Průběh závislosti změny středního objemu kráteru na počtu impaktů.	44
Obr. 43 Průběh závislosti změny střední hloubky kráteru na počtu impaktů.	44
Obr. 44 Závislosti stř. objemu kráteru na počtu impaktů pro vzorek s povlakem TiCN.....	45
Obr. 45 Snímky vzorků po impaktním testování.....	46
Obr. 46 Snímek kráterů na vrstvě Stellite 6 po impaktním testování.....	46
Obr. 47 Snímek kráterů na vrstvě nástrojové oceli M2 po impaktním testování	46
Obr. 48 Snímek kráterů na vrstvě WC v Ni matrici po impaktním testování.....	47
Obr. 49 Makrostruktura vrstvy Stellite 6.....	47

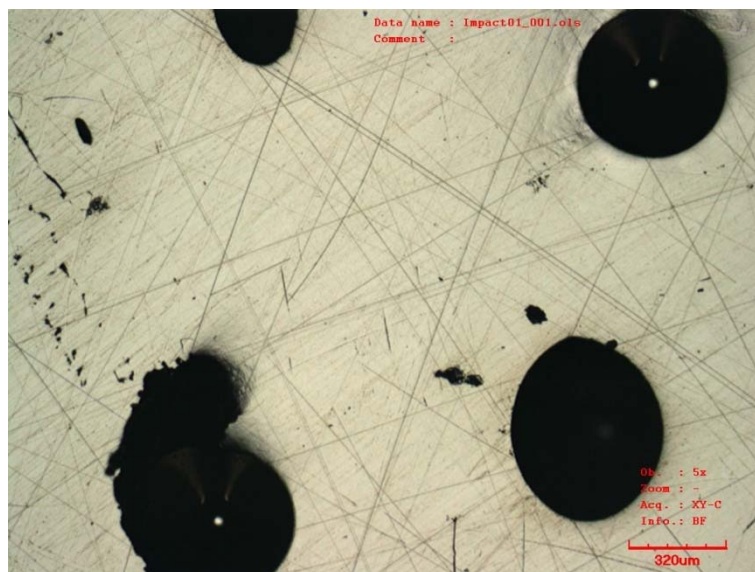
Obr. 50 Makrostruktura vrstvy z nástrojové oceli M2.....	48
Obr. 51 Makrostruktura vrstvy z WC v Ni matrici.....	48
Obr. 52 Mikrostruktura přechodové oblasti mezi vrstvou Stellite 6 a substrátem	49
Obr. 53 Mikrostruktura přechodové oblasti mezi vrstvou nástrojové oceli M2 a substrátem..	49
Obr. 54 Mikrostruktura vrstvy NiCrBSi + WC a substrátem	50
Obr. 55 Závislost průběhu mikrotvrdosti na vzdálenosti od povrchu vzorku č. 1.....	51
Obr. 56 Závislost průběhu mikrotvrdosti na vzdálenosti od povrchu vzorku č. 2.....	51
Obr. 57 Závislost průběhu mikrotvrdosti na vzdálenosti od povrchu vzorku č. 3.....	52
Obr. 58 Měření mikrotvrdosti u vrstvy Stellite 6	52
Obr. 59 Měření mikrotvrdosti u vrstvy WC v Ni matrici	52
Obr. 60 Měření mikrotvrdosti vrstvy z nástrojové oceli M2	53

TAB. 1 Základní přehled průmyslových laserů.....	20
TAB. 2 Vlastnosti navařených vrstev	28
TAB. 3 Srovnání laserového navařování s ostatními metodami povrchových úprav	31
TAB. 4 Chemické složení oceli 19 830	40
TAB. 5 Mechanické vlastnosti oceli 19 830.....	40
TAB. 6 Chemické složení a vlastnosti prášku Stellite 6.....	40
TAB. 7 Chemické složení nástrojové oceli M2	41
TAB. 8 Mechanické vlastnosti prášku z nástrojové oceli M2	41
TAB. 9 Chemické složení a vlastnosti kovového prášku NiCrBSi	41
TAB. 10 Vlastnosti prášku z karbidu wolframu	41
TAB. 11 Hodnoty odporu proti opotřebení	45
TAB. 12 Tabulka naměřených hodnot tvrdosti vzorků	50
TAB. 13 Tabulka naměřených hodnot mikrotvrdosti Stellite 6 a substrátu	51
TAB. 14 Tabulka naměřených hodnot mikrotvrdosti nástrojové oceli M2 a substrátu	51
TAB. 15 Tabulka naměřených hodnot mikrotvrdosti vrstvy WC v Ni matrici a substrátu	52
TAB. 16 Srovnání nákladů na vytvoření povlaku pomocí různých metod	53

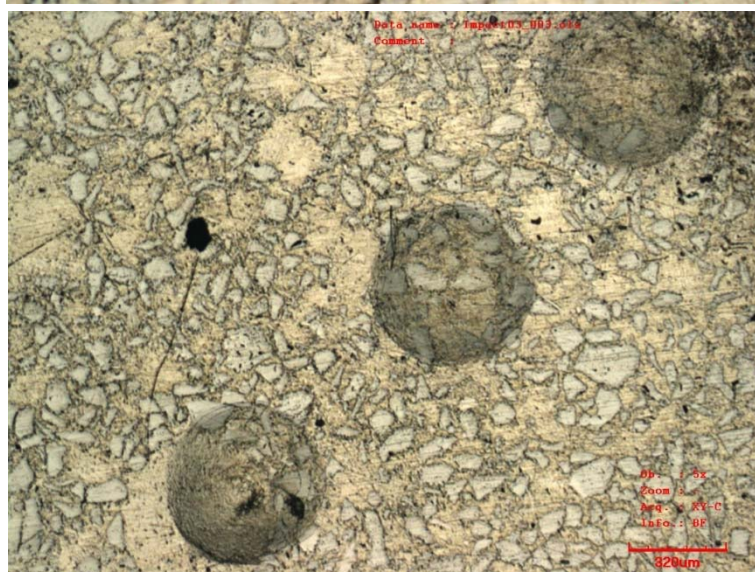
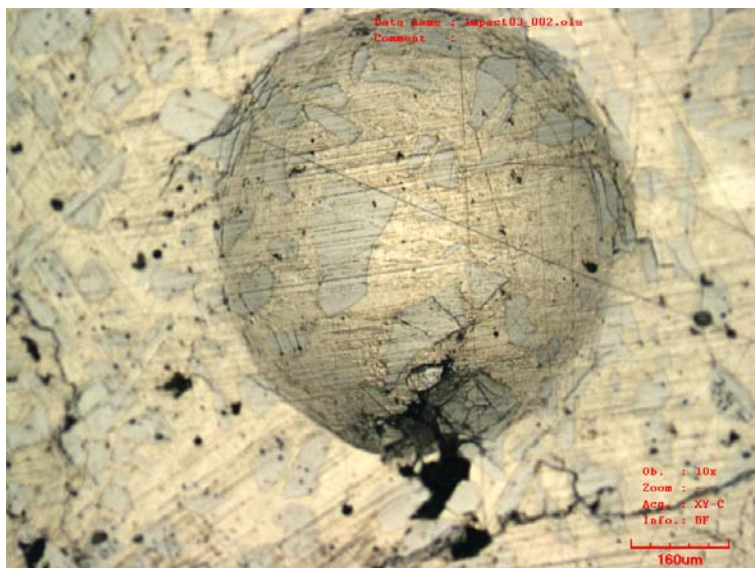
Seznam příloh

- | | |
|-------------|---------------------------------------|
| Příloha č.1 | Snímky kráterů po impaktním testování |
| Příloha č.2 | Snímky mikrostruktury vzorků |

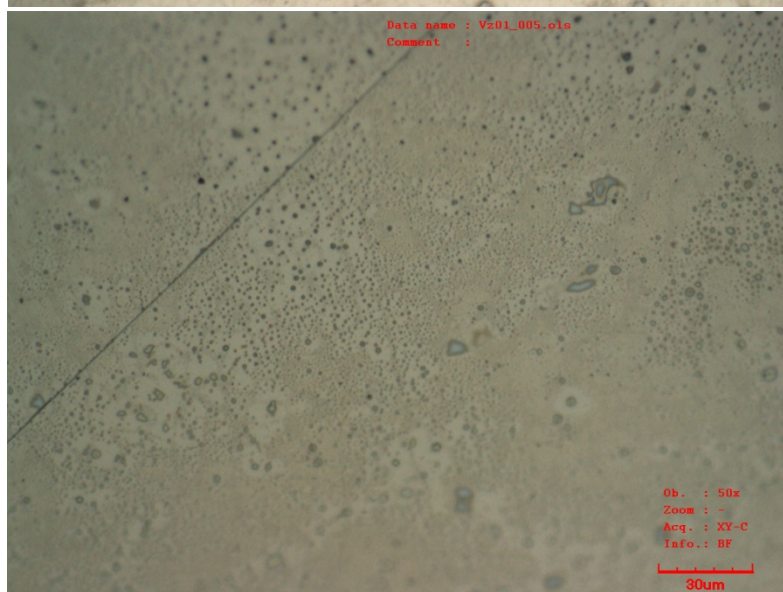
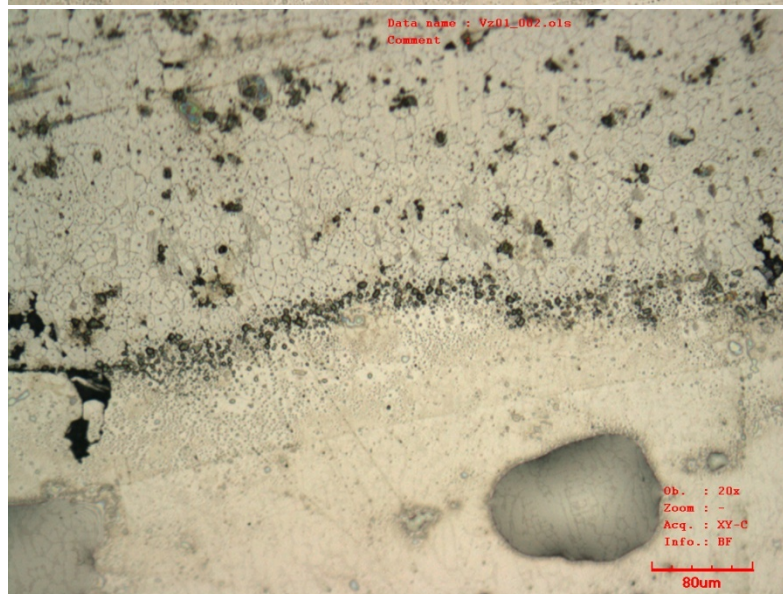
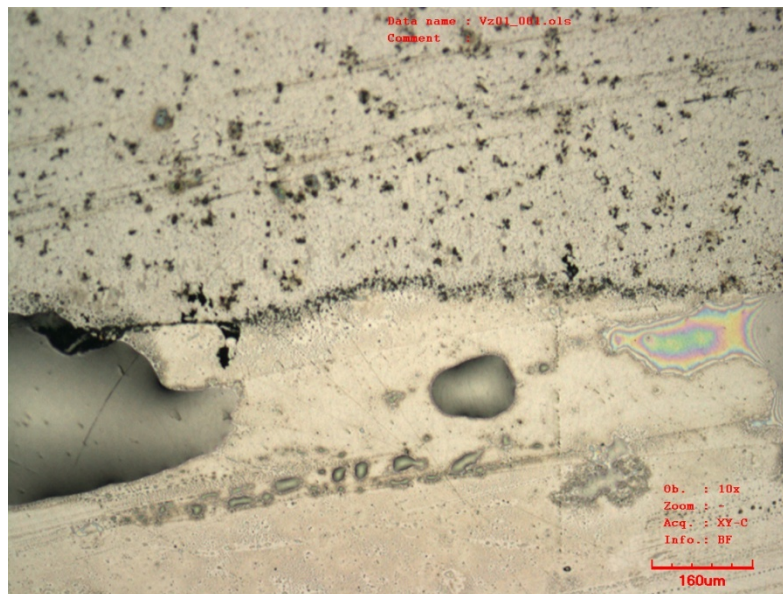
Příloha č.1 Snímky kráterů po impaktním testování
Vrstva nástrojové oceli M2



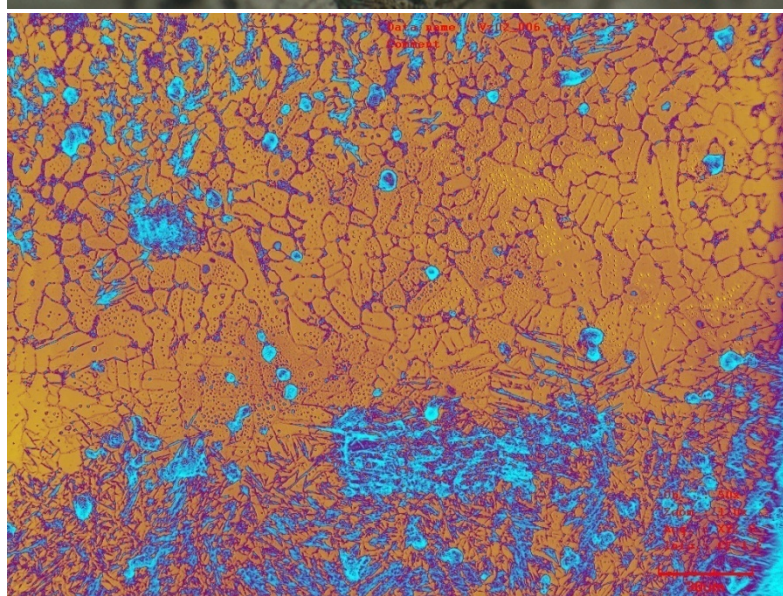
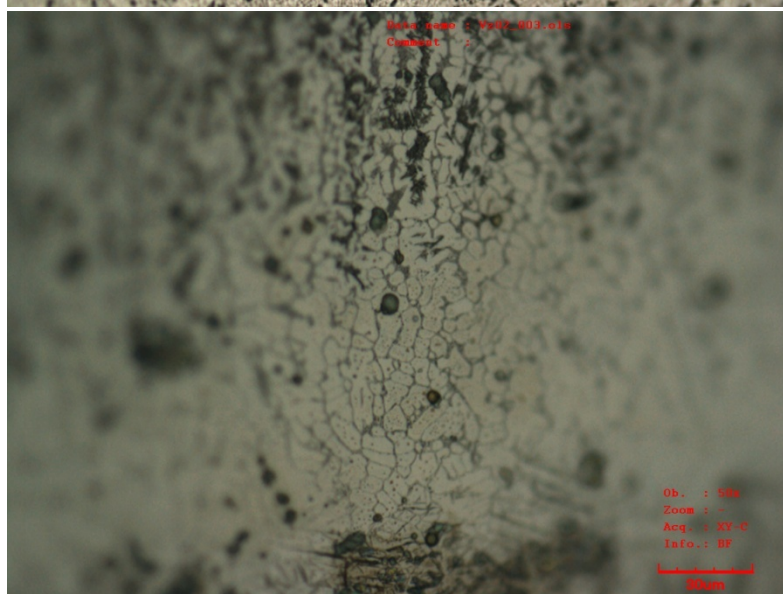
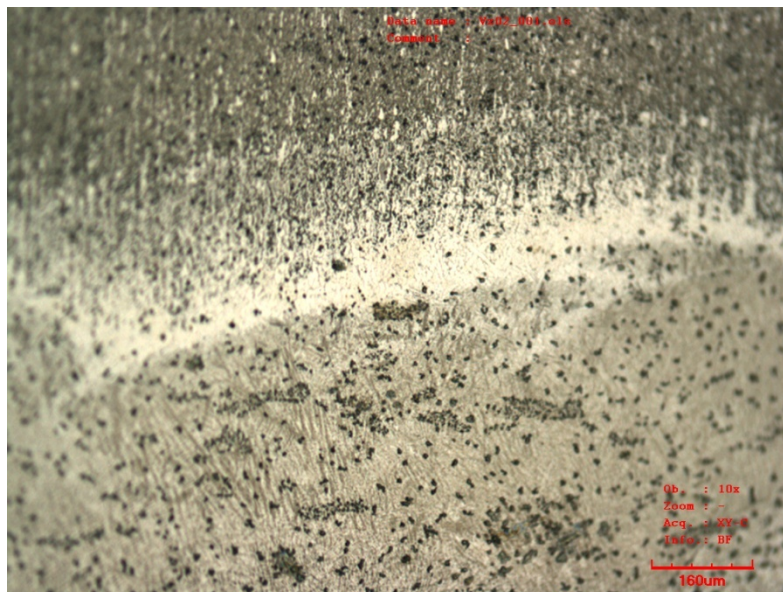
Vrstva WC v Ni matrici



Příloha č.2 Snímky mikrostruktury vzorků
Vrstva Stellite 6



Vrstva nástrojové oceli M2



Vrstva WC v Ni matrici

